

GUSTAVO VIEIRA PEREIRA

**SISTEMA INSTRUMENTADO PARA O REGISTRO
DE COMPORTAMENTOS INGESTIVOS**

**FLORIANÓPOLIS
2003**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SISTEMA INSTRUMENTADO PARA O REGISTRO
DE COMPORTAMENTOS INGESTIVOS**

**Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.**

GUSTAVO VIEIRA PEREIRA

Florianópolis, setembro de 2003

SISTEMA INSTRUMENTADO PARA O REGISTRO DE COMPORTAMENTOS INGESTIVOS

Gustavo Vieira Pereira

**‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em
Engenharia Biomédica, e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina’**

**José Marino Neto, Dr.
Orientador**

**Edson Roberto de Pieri, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica**

Banca Examinadora:

**José Marino Neto, Dr.
Presidente**

Jefferson Luiz Brum Marques, Ph.D.

Ildon Guilherme Borchardt, Dr.

Marta Aparecida Paschoalini, Dra.

Raimes Moraes, Ph.D.

Fernanda Isabel Marques Argoud. Dr.Eng.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

SISTEMA INSTRUMENTADO PARA O REGISTRO DE COMPORTAMENTOS INGESTIVOS

Gustavo Vieira Pereira

setembro / 2003

Orientador: José Marino Neto, Dr.

Área de Concentração: Engenharia Biomédica

Palavras Chave: eatômetro, ingestão, comportamento, medição, instrumentação, rede, barramentos

Número de páginas: 87

RESUMO:

Este trabalho descreve um sistema automático para registro de parâmetros que permitam o estudo de atributos do comportamento ingestivo de animais em laboratório. Este sistema é orientado a usuários que não são profissionais da área de engenharia. Portanto, dispensa a necessidade de configurações eletrônicas que são desestimulantes para biólogos, fisiologistas, nutricionistas e etc. O sistema é formado por: 1) placas de aquisição (ou estações) distribuídas no espaço, uma para cada gaiola de animal, orientadas à coleta de dados digitais e analógicos, flexíveis à leitura de diversos tipos de sensores, 2) um protocolo de rede definido em 3 camadas (Física, Enlace de Dados e Rede) de acordo com o modelo ISO-OSI, de forma a prestar um serviço de conexão organizado entre as estações e um computador (padrão IBM-PC), e 3) um software aplicativo para registrar em um computador os parâmetros enviados pelos sensores das estações. Este sistema serve de plataforma para criação de diferentes *módulos de registro* (compostos por sensores e aplicativo de registro), cada um orientado ao determinado parâmetro que se deseja investigar. O uso do sistema dispensou o registro manual destes dados e permitiu a medição contínua de fenômenos ingestivos (água e alimentos), além da temperatura ambiente, por períodos longos, maiores que 24h.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

INSTRUMENTED SYSTEM FOR INGESTIVE DATA ACQUISITION

Gustavo Vieira Pereira

September / 2003

Advisor: José Marino Neto, Dr.

Area of Concentration: Biomedical Engineering

Keywords: eatometer, instrumentation, measurement, smart sensors, fieldbus

Number of pages: 87

ABSTRACT:

The present work describes an automatic system for the recording and acquisition of data related to attributes of ingestive behavior in experimental animals. This system is intended to be used by professionals that are not engineers. So, there is no needs of electronics or software setup, that are difficult tasks for biologists, physiologists, nutritionists and others. This system includes: 1) acquisition boards (or stations), spatially distributed one per cage, suitable for several kinds of analog and digital sensors, 2) a three layered network protocol (Physical, Data Link and Network, in accordance with ISO-OSI model) to perform an organized communication service between the stations and a computer (IBM-PC standard), and 3) software to record data sent by station sensors on a computer. This system is intended to establish a platform for distinct *recording modules* (sensors and recording software), suitable for an specific set of parameters. This system avoids manual recording procedures, and allowed for continuos measurements of ingestive phenomena, environment temperature, for long periods more than 24h.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PREFÁCIO	1
1.2 MOTIVAÇÃO	2
1.3 JUSTIFICATIVA.....	3
1.4 OBJETIVOS	7
2. DEFINIÇÃO DO SISTEMA	9
2.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA	11
3. DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA FÍSICA DO SISTEMA.....	12
3.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO	12
3.2 ARQUITETURA DO SISTEMA DESENVOLVIDO	13
4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA.....	19
4.1 TRANSDUTORES	19
4.2 ESTAÇÕES	21
4.2.1 CONVERSOR A/D.....	22
4.2.2 FONTE	27
4.2.3 MICROCONTROLADOR	29
4.3 REDE.....	30

4.3.1 MODELO DE REFERÊNCIA ISO-OSI	31
4.3.2 ESCOLHA DA TOPOLOGIA	33
4.3.3 CAMADA FÍSICA	35
4.3.4 CAMADA DE ENLACE DE DADOS E CAMADA DE REDE.....	36
4.4 SERVIÇO DE ACESSO À REDE	37
4.4.1 SERVIÇO DE ACESSO À REDE NAS ESTAÇÕES	38
4.4.2 SERVIÇO DE ACESSO À REDE NO COMPUTADOR.....	39
5. ANÁLISE DA IMPRECISÃO DO SISTEMA.....	40
5.1 ERROS DE <i>OFFSET</i> E GANHO	42
5.2 ERRO TOTAL DE NÃO-LINEARIDADES	43
5.3 REJEIÇÃO DE MODO COMUM (CMRR – COMMON MODE REJECTION RATIO)	44
5.4 INCERTEZA DE DISCRETIZAÇÃO	45
5.5 REJEIÇÃO À FONTE DE ALIMENTAÇÃO (POWER SUPPLY REJECTION RATIO)	45
5.6 INCERTEZA POR INFLUÊNCIA DE RUÍDOS.....	46
5.7 IMPRECISÃO EM RESUMO	47
6. MÓDULO DE REGISTRO DE PARÂMETROS PONDERAIS	48
6.1 TRANSDUTORES	48
6.1.1 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA METÁLICA DA CÉLULA DE CARGA	50
6.1.2 A CÉLULA DE CARGA CONSTRUÍDA.....	57
6.2 APLICATIVO DE REGISTRO.....	59
7. TESTES.....	67
7.1 TESTES PARA AVALIAÇÃO DAS CÉLULA DE CARGA.....	67
7.2 TESTES COM ANIMAIS	75

8. DISCUSSÕES.....	77
9. CONCLUSÕES	80
ANEXO 1 – ESQUEMA ELETRÔNICO DA ESTAÇÃO	81
ANEXO 2 – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O sistema desenvolvido é uma plataforma que permite a inserção de módulos, orientados ao tipo de parâmetro de comportamento que se deseja investigar.	10
Figura 2– O cenário do trabalho pode ser definido por dois sistemas: um sistema medido e um sistema de medição, que é o trabalho em si.	12
Figura 3 – O sistema desenvolvido pode ser analisado como um sistema de medição, que poderia ter uma estrutura como esta.	13
Figura 4 – Uma possível arquitetura para o sistema, porém inadequada por requerer muitas conexões físicas (cabos). Isto pode inviabilizar a medição de sinais analógicos de baixa intensidade, já que o tamanho dos cabos prejudica a relação sinal/ruído.....	15
Figura 5– Esta arquitetura digitaliza e multiplexa os sinais no local onde são gerados, diminuindo a quantidade de cabos na instalação e incrementando a qualidade do sinal que chega ao computador. No entanto, ainda agrega desvantagens quanto à flexibilidade de instalação e quantidade de equipamentos envolvidos no sistema...	16
Figura 6 – Arquitetura implementada para conferir maior flexibilidade e economia de instalação. Não é necessária placa de aquisição no computador e todas as estações compartilham o mesmo cabo, que além dos sinais transporta alimentação para o sistema.	17
Figura 7 – Arquitetura escolhida, sob o ponto de vista de um sistema de medição.....	18
Figura 8 – Função da estação no sistema de medição: condicionar e digitalizar os sinais dos transdutores, e colocá-los em um formato adequado para serem transmitidos no barramento.....	21
Figura 9 – <i>Hardware</i> da estação: um conversor A/D que engloba toda a etapa de condicionamento; um microcontrolador para programar o conversor, ler entradas digitais e executar o serviço de rede e um driver (somente para estação mais próxima ao computador), para transformar os níveis TTL do microcontrolador em RS-232.....	22
Figura 10 – Processo de conversão: o A/D faz a média de 5200 valores amostrados a 312kHz, na entrada selecionada e gera um dado de saída na taxa de 60Hz, que ainda será aplicado a um filtro média móvel de ordem 3.....	24

Figura 11 – Resposta do Filtro. Como o conversor efetua a média de todas amostras de um intervalo de tempo de 1/60s, qualquer componente de frequência que possua períodos inteiros neste intervalo apresenta média zero, ou seja um filtro rejeita-faixa em múltiplos de 60Hz.....	25
Figura 12 – a) Na inicialização o sistema programa o A/D para converter o Canal 0 de entrada analógica. b) A cada interrupção do A/D (conversão) o algoritmo testa se o valor de saída do filtro digital do A/D é valido para este canal. Se for, o microcontrolador lê este dado e troca o canal do A/D para a próxima conversão.	26
Figura 13 – Configuração usada para referência de tensão. Se a tensão de excitação variar, por algum efeito indesejado, a amplitude do sinal e da referência variam na mesma proporção, não alterando a relação entre si, consequentemente, não alterando o valor da conversão.	28
Figura 14 – O processador executa duas tarefas básicas, chamadas por interrupção: 1) rotina de leitura das entradas, chamada pelo A/D (quem gera a taxa de amostragem) e 2) rotina de rede, chamada pela porta serial (quando recebeu ou quando está pronta para transmitir). A comunicação entre as tarefas é feita através de um bufar.	30
Figura 15 – Protocolo de rede dividido em camadas. Cada camada presta um serviço definido à camada superior.....	32
Figura 16 – Topologia da rede usada no SIRCI: o tráfego de quadros aumenta a medida que se aproxima do computador, contudo, cada estação possui um meio exclusivo de transmissão, e não é necessário arbitrar o direito de uso do barramento.....	34
Figura 17 – Padrão de tensões TTL e RS-232C.	35
Figura 18 – Formato do quadro de rede.....	36
Figura 19 – A rotina de leitura das entradas (nas estações) simplesmente entrega seus dados ao Serviço de Acesso a Rede, enquanto que o aplicativo de registro (no computador) simplesmente pede o dado da estação desejada para o Serviço de Acesso a Rede. Ambos não precisam inteirar-se das tarefas necessárias à comunicação.	37
Figura 20 – Formato do <i>buffer</i> criado pelo Serviço de Acesso a Rede no computador. Este <i>buffer</i> é a interface da rede para os aplicativos.	39
Figura 21 – Função de conversão ideal do A/D: tensões de entrada entre V_{min} e $V_{máx}$, são convertidas linearmente para representação digital entre 00H e FFFFFFFH.	41
Figura 22 – Tipos de erros que o conversor A/D pode agregar na conversão.....	41

Figura 23 – Erros de <i>offset</i> e ganho. O erro de <i>offset</i> causa uma mudança no coeficiente linear da reta (soma um valor de erro ao valor real da conversão). O erro de ganho muda o coeficiente angular da curva (multiplica o valor da conversão por um fator de erro.).....	42
Figura 24 – Não-linearidade da função real: nos pontos de calibração a função real e função ideal de conversão se encontram, porém, afastando-se destes pontos pode existir uma diferença.....	43
Figura 25 – Curva de não-linearidade do conversor: o erro diminui à medida que se aproxima dos pontos que o conversor usou para fazer a autocalibração ($-2V_{ref}$, 0 e $2V_{ref}$). Para $-1V < V_{in} < 1V$, o erro é proporcional a V_{in} , em 2ppm/ V_{in} . Por exemplo, para uma tensão de entrada de 1mV, o erro máximo seria 0,002ppm do fundo de escala de 10V, ou seja, 20nV apenas.....	44
Figura 26 – Ruído na conversão à taxa de 5Hz. O valor eficaz do ruído é de $1,2\mu V_{rms}$	46
Figura 27 – Foto de três transdutores de peso fixados externamente a gaiola. A base em forma de cruz é a parte sensível ao peso.	48
Figura 28 – Foto do suporte para comedouros/bebedouros sendo encaixado no transdutor.	49
Figura 29 – Foto do suporte com detalhe do anteparo contra <i>spillage</i>	49
Figura 30 – Detalhes da estrutura do transdutor. A célula de carga (elemento transdutor) é fixada de um lado à estrutura presa na gaiola, e de outro à base livre, onde se encaixam os suportes para comedouros/bebedouros.	50
Figura 31 – Processo de transdução na célula de carga: a força é transformada em deformação, transferida ao strain-gauge através da cola, transformada em variação de resistência elétrica que, por fim, a ponte transforma em variação de tensão....	50
Figura 32 – Deformação metálica típica. Na região elástica de deformação, cessado o estresse (força), o metal volta o tamanho original. Se a deformação, porém, atingir a região plástica, cessado o estresse o metal conservará a deformação (deformação residual) que extrapolou o limite elástico.	51
Figura 33 – Modelo simples de célula de carga: uma barra é engastada em uma extremidade. Na outra se aplica uma força que causará flexão na barra, e, deformação na região onde estão colados os <i>strain-gauges</i>	52
Figura 34 - Strain-gauges, SGA e SGB em 1/2 ponte.....	52
Figura 35 - A medida desta célula varia com o momento ($P \times L$), que pode mudar de acordo com a distribuição de comida dentro do comedor.....	53

Figura 36 – Modelo de célula de carga seletiva a peso.	54
Figura 37 - Modelo sofrendo deformação.....	55
Figura 38- Ponte completa de strain-gauges.....	56
Figura 39 – Condições para diminuir o efeito da força normal no strain-gauge: estrutura laminar, ou seja, $b \gg h$	57
Figura 40 - Célula de carga construída.	58
Figura 41 – Célula construída (em 2D) sofrendo deformação.....	59
Figura 42 – Tela do aplicativo. Quando uma estação é encontrada, o aplicativo pede um nome para a estação e abre uma interface gráfica para controlá-la.....	61
Figura 43 – Aplicativo procurando as células de carga conectadas na estação.	62
Figura 44 – Tela de calibração: o aplicativo orienta o usuário o sistema para a célula de carga.....	63
Figura 45 – Reta de calibração: define a função de transferência entre o valor da conversão do A/D e o valor de peso informado pelo sistema. O usuário fornece dois pontos conhecidos para que o sistema determine a função (reta): um sem peso sobre o transdutor (P1), e outro com um peso conhecido (P2).	63
Figura 46 – Detalhe do <i>status</i> dos canais. Após o processo de calibração, o aplicativo atualiza o nome dos canais, com o nome dado ou com o estado do canal.....	64
Figura 47 – Tela para inserção de comentários. O usuário pode selecionar um comentário pré-determinado ou digitar sua própria observação. Este apontamento é anexado no arquivo de registro. ..	65
Figura 48 – Formato do arquivo de saída: contém informação do peso, para cada amostra, além de informações sobre o experimento e calibração.	66
Figura 49 – Teste de estabilidade das células de carga, primeiras 24h. Cada uma das linhas coloridas representa o peso medido (eixo vertical esquerdo) em cada uma das células, ao longo do tempo. Conforme a legenda, a linha azul claro informa a temperatura (eixo vertical direito).....	72
Figura 50 – Continuação do teste (24h seguintes)	73
Figura 51 – Momento de colocação das cargas.	74
Figura 52 - Momento de retirada das cargas (24h depois)	75

Figura 53 – Três eventos ingestivos: água, solução salina e ração. As bicadas são identificadas pelos picos do gráfico. O consumo equivale ao peso antes menos o peso após a(s) bicada(s). 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características básicas do conversor A/D.....	23
Tabela 2 - Resumo das fontes de imprecisão do sistema.	47
Tabela 3 - Sensibilidade e desbalanço das células de carga.....	68
Tabela 4 - Imprecisão do sistema na aplicação com as células de carga: o ruído de conversão é o único item relevante.....	68
Tabela 5 - Precisão nas medidas para diferentes taxas.....	69
Tabela 6 - Erro de excentricidade.....	70
Tabela 7 - Teste de linearidade (faixa de 0 -10g): colocação das massas.....	71
Tabela 8 - Variações a longo prazo das células de carga.....	73

1. INTRODUÇÃO

1.1 Prefácio

O corpo humano é resultado de um processo seletivo que impôs severas restrições externas de insumo energético. Portanto, a evolução criou dispositivos de preservação, tanto instintivos quanto físicos, que equiparam o homem com um bom sistema de acúmulo de energia para ser usada em longo prazo. Atualmente, porém, estes dispositivos criados para preservar a vida acabam agindo contra a própria saúde.

O estilo de vida contemporâneo demanda cada vez menos gasto de energia e o ambiente deixou de impor as restrições à alimentação que impunha antes. Pelo contrário, a moderna dieta ocidental oferece uma abundância de alimentos com alta densidade calórica [1]. O resultado disto é uma diferença de energia (energia ingerida menos a gasta) que sobra e acaba sendo acumulada em forma de gordura. Em outras palavras, boa parte do mundo oferece um cenário perfeito para quebra do balanço energético corporal.

De fato, no final do século passado e no começo deste século, um número dramático de humanos, de diferentes ambientes culturais, envolveu-se neste dilema do controle de seu peso corporal. Levantamentos demonstram, por exemplo, que o peso corporal médio, o índice de massa e a percentagem de indivíduos obesos estão aumentando em países como Brasil [2], USA [3], Dinamarca [4], e outros. Nos EUA, por exemplo, desordens causadas por sobrepeso vêm em terceiro lugar como causa de mortes, perdendo apenas para o tabagismo e o álcool [1]. Estes dados sugerem a importância do estudo dos mecanismos envolvidos no balanço energético corporal [5].

1.2 Motivação

Nos últimos 8 anos, o Laboratório de Neurofisiologia da UFSC (LNFI) tem examinado sistematicamente o papel de circuitos serotoninérgicos [6][7] e catecolaminérgicos [8][9] na ingestão de alimentos em pombos, que parecem ser um bom modelo para investigar o comportamento alimentar.

A organização temporal do comportamento alimentar do pombo envolve uma escala da ordem de milisegundos, comparável com a escala da atividade neural, portanto os padrões de movimentos relacionados à alimentação podem ser unidades úteis de comportamento para o estudo neurocomportamental de mecanismos de controle do comportamento alimentar. Além disto, relação regular entre o peso corporal e o comportamento alimentar do pombo permite manipulações experimentais de variáveis motivacionais [10]. Somando-se sua robustez, disponibilidade e fácil manutenção, o pombo doméstico tem sido um excelente candidato a estudos desta ordem .

No LNFI, as investigações realizadas mostraram que nos pombos, como em mamíferos, drogas como a serotonina e a adrenalina têm efeitos respectivamente hipo e hiperfágicos. Foi também observado que os sistemas centrais que regulam estes efeitos no hipotálamo e no tronco cerebral, guardam semelhanças aos observados em mamíferos.

Os estudos realizados pelo LNFI e outros laboratórios [11][12] têm contribuído para elucidar aspectos fundamentais ou espécie-específicos dos sistemas de regulação do balanço energético nas aves e têm contribuído também para melhor compreensão dos mecanismos que operam na sensibilidade especial dos pombos aos demais efeitos comportamentais (e.g., ansiolíticos e antidepressivos) destes compostos. Por isso, os resultados dos estudos do LNFI podem contribuir para o estabelecimento do pombo como um modelo pré-clínico importante na investigação de agentes potencialmente ansiolíticos, antidepressivos e drogas que possam ser de utilidade no controle de doenças, tanto em humanos como em outros animais, que envolvem ou afetam os comportamentos ingestivos, como as obesidades e as anorexias. No desenvolvimento destes estudos, no entanto, foram observados uma série de problemas metodológicos (ver adiante) na coleta dos dados referentes aos

atributos do comportamento. A busca pela solução para estes problemas constituiu a motivação deste trabalho.

1.3 Justificativa

A investigação do ato de comer em situações espontâneas, de livre acesso à comida, após períodos de privação, ou sobre efeito de drogas, é um pré-requisito importante no estudo do comportamento ingestivo [13]. Os métodos empregados nestas investigações incluem, necessariamente, o registro de parâmetros (medidas) que representam atributos (características) do comportamento alimentar.

Alguns parâmetros descrevem atributos micro-estruturais (movimentos para alcançar o alimento, bicadas, mastigação), ações que são relativamente estereotipadas (padrões) e típicas de cada espécie, e são executadas em uma escala de tempo relativamente pequena. O registro destes parâmetros demanda observações rápidas do animal enquanto se alimenta. Os parâmetros micro-estruturais representam particularidades de padrões comportamentais mais complexos e oferecem paradigmas para a análise do controle neural, em função de seu presumido estereótipo e relativa simplicidade [10].

Outros parâmetros descrevem atributos macro-estruturais, como quantidades, tipos e seqüência de alimentos preferidos pelos animais, frequência e velocidade com que se alimentam, entre outros. Estes parâmetros se relacionam com o efeito de manipulações sobre a comida (palatabilidade, textura, forma) ou sobre o animal (privação-jejum, drogas). As análises dos atributos macro-estruturais demandam observações de longo prazo, ao longo do ciclo circadiano. Para avaliar a estabilidade do padrão de comportamento alimentar no tempo, e sua relação com dia e noite, é necessário um registro contínuo (de 24h, por exemplo) [13]. Estas análises podem ajudar a elucidar os resultados de estudos neurocomportamentais sobre efeito de drogas na ingestão de água e alimentos, além das implicações nas teorias sobre a motivação para comer.

No LNFI, diversos trabalhos usam um método comum para o registro destes parâmetros. Pombos adultos são transferidos do biotério para a sala de registro, onde, após um período de adaptação ao local, são tratados por via

intracerebroventricular com uma droga específica. Imediatamente após o tratamento, as aves voltam às gaiolas e começa o período de observação, que é realizada através de uma janela de vidro pequena, para que o animal não se inteire da presença do pesquisador.

Durante a observação, são registrados manualmente parâmetros como:

- latência, incidência e tempo para comer/beber;
- tipo de alimento e tipo de água consumido (em algumas ocasiões se disponibiliza água pura e solução salina para o animal);
- comportamentos exploratórios, de autolimpeza, sono;
- eventos adversos que possam interferir ou interessar ao experimento.

Após o período de observação, os alimentos e a água são pesados. O consumo é dado pelo peso inicial, registrado antes do início da observação, menos o peso ao final da observação.

Neste método de registro foram identificados os seguintes problemas:

- os parâmetros relativos a atributos micro-estruturais, como frequência de bicadas e outros, com duração de poucos segundos, não são passíveis de medição, já que extrapolam a capacidade de observação humana;
- a incidência de refeições e a duração da refeição, nem sempre são registrados em tempo hábil, pois o observador, ao anotar um evento, pode não observar um outro;
- a quantidade de comida consumida no período de observação é sabida, mas a quantidade por refeição é desconhecida, a não ser que se interfira no ambiente do animal para pesar novamente a comida (problema também referido por ZEIGLER et al. [13];
- registro de parâmetros relativos aos atributos macro-estruturais, como a distribuição do comportamento ao longo de 24h, exigiria a participação de mais de um observador. Portanto estaria sujeito a erros de parcialidade na avaliação;

- a necessidade da atenção constante do observador torna esta tarefa desgastante e sujeita o registro a erros causados por fadiga.

Neste caso, fica evidente que as deficiências na coleta dos parâmetros são causadas pela incapacidade do investigador de registrar manualmente os parâmetros desejados. De fato, a literatura apresenta diversos métodos para registrar parâmetros micro e macro-estruturais, melhores que o método manual de observação, mas que, ainda assim, são deficientes.

HÖRSTER et al. [14] e MARTARESCHE et al. [15], usaram um método que deriva da observação manual. Eles usaram filmagem para observar parâmetros micro-estruturais de movimentos e eventos rápidos, que em tempo real não seriam perceptíveis, como o tempo que o pombo mantém a cabeça procurando o alvo (comida), o tempo que leva para atingir a comida e a frequência das bicadas. Desta maneira estes autores amplificaram a capacidade de observação no tempo, mas a análise posterior do filme, quadro a quadro, continuava sendo uma tarefa manual. MARTARESCHE et al. [15], também registraram parâmetros semelhantes com barreiras ópticas e um disco piezzo-elétrico. Neste esquema os animais eram condicionados a bicar um determinado número de vezes no disco para obter comida. Os sinais das barreiras ópticas e do disco piezzo-elétrico eram registrados para posterior análise em um computador pessoal, padrão IBM-PC [16], através de uma placa de aquisições comercial de modelo não citado. Este método, no entanto, exige o condicionamento do animal ao esquema de recompensa de alimento, o que já causa uma alteração de comportamento que não corresponde a situações naturais, de livre acesso à comida. A mesma desvantagem apresenta o sistema descrito por LAX et al. [17]. Eles descreveram um sistema para coletar parâmetros macro-estruturais, como atividade motora de ratos e tentativas de obter comida durante esquemas de privação. Para isso utilizaram um sistema dedicado, “feito em casa”, com solenóides para liberar o acesso a comida e micro-chaves para detectar, por contato, a presença do animal tentando comer. A atividade era medida através de uma roda-livre que atuava sobre outra micro-chave que mandava pulsos a um contador. O solenóide é ativado por temporizador e os estados das micro-chaves são lidos por uma placa de aquisição para PC (CIO-DIO-96, Computer Board Inc).

ZEIGLER et al. [13] descreveram um sistema de registro de alimentação para pombos que não necessita de um esquema de condicionamento. Neste sistema, as bicadas dos animais no comedouro interrompiam uma foto-célula. Estes eventos eram contados em um contador eletrônico e o momento no tempo, gravado em um registrador mecânico. Este método, porém, não permitia a monitoração contínua no tempo, e, portanto, segundo os autores, não era possível calcular de maneira direta a relação entre ingestão, número de tentativas de comer, e duração das refeições. Portanto, em situações experimentais como esta, era difícil obter diretamente a relação entre o comportamento de comer e a quantidade de comida ingerida.

Além das desvantagens particularmente citadas, verifica-se que todos estes sistemas de registro ainda apresentam desvantagens comuns:

- são extremamente específicos, prestam-se ao registro de poucos parâmetros micro ou macro-estruturais;
- demandam tempo para montagens mecânicas, configuração de placas de aquisição, ajuste de transdutores, enfim, atividades que não são a atividade alvo dos investigadores;
- enfim, estes métodos apresentam desvantagens que derivam do fato de que nenhum deles utiliza um sistema propriamente desenvolvido para as investigações. Na verdade, estes sistemas não passam de adaptações de componentes ou transdutores de aplicação geral, desenvolvidos pelos próprios investigadores.

Esta série de desvantagens sugere, portanto, a procura por sistemas comerciais de aquisição, mais dedicados a estudos com animais. Este é o caso de SIEMANN e DELIUS [18], que estudaram o padrão de bicadas de pombos com um acelerômetro fixado a cabeça do animal e um sistema de aquisição de dados, Neurolog (Digitimer Ltd, England - www.digitimer.com), com interface para computador pessoal. Neste caso porém, as desvantagens recaem sobre outros aspectos: por mais dedicados que sejam a pesquisas de ordem biológica, os sistemas comerciais de aquisição tentam, com a mesma linha de equipamentos, atender a uma diversidade de tipo de experimentos. Para isso, estes fabricantes fornecem muitos módulos e diversos tipos de transdutores. Por um lado, isso

encarece a solução baseada em seu produto, por outro, a configuração eletrônica, configuração de software, interconexão de módulos, especificação de transdutores e outros aspectos técnicos, são desestimulantes para investigadores que não são da área de engenharia, como fisiologistas, biólogos, nutricionistas e todos que trabalham com estas linhas de pesquisas.

Disto, conclui-se que um sistema desenvolvido de maneira realmente orientada às investigações dos atributos do comportamento alimentar, de baixo custo, que eliminasse as desvantagens apontadas seria de grande valia, pois permitiria ao LNFI aumentar a precisão e produtividade nos experimentos existentes e desenvolver outros experimentos até então metodologicamente inviáveis (como aqueles que demandam registros de longa duração).

1.4 Objetivos

Dado o problema descrito anteriormente, propõe-se o desenvolvimento de um sistema que registre de forma automática e sistemática, os atributos micro e macro-estruturais da ingestão de alimentos em aves e permita a medição contínua destes fenômenos, sem os efeitos deletérios de interferências no ambiente do animal, bem como as imprecisões relativas a medições manuais repetitivas.

Além disto, devido à quantidade de dados registrados, à necessidade de tratamento matemático e estatístico dos mesmos, e devido à facilidade de reprodução, divulgação e todas outras vantagens aplicadas a documentos digitais, este registro dos parâmetros do comportamento deve ser feito em computador padrão IBM-PC e sistema operacional Windows 95/98 [19][20], dada a difusão deste padrão e destes sistemas operacionais, respectivamente.

No LNFI, os atributos do comportamento ingestivo mais estudados demandam o registro dos parâmetros ponderais do consumo de alimentos. No entanto, com o intuito de desenvolver um trabalho de utilidade mais robusta às variações das necessidades de investigação do laboratório idealizou-se um sistema que esteja aberto à medição e registro de parâmetros de outros atributos que venham despertar interesse futuro. Além disto, os próprios estudos com os

parâmetros ponderais podem ser realizados com um, dois ou mais animais. Portanto, é imperativo que este sistema seja flexível, de modo a permitir o registro de n tipos de parâmetros, para uma quantidade m de animais, de forma que seu custo e complexidade cresçam conforme a necessidade da investigação. Em contrapartida, esta flexibilidade não pode trazer complexidade de operação para o investigador, ou seja, não pode implicar em complicadas configurações de hardware ou software no sistema.

2. DEFINIÇÃO DO SISTEMA

Diferentes parâmetros dos atributos de comportamento podem requerer formatos distintos de registro e tipos distintos de transdutores. Por exemplo, o sistema poderia ser usado para medir parâmetros como a luminosidade do ambiente e a quantidade de 3 tipos de comida consumida pelo animal que está em experimento. Para luminosidade, poderia ser utilizado um transdutor foto-elétrico, com sinal de saída variando entre 0 e 1mA aproximadamente. Para pesar os alimentos poderiam ser utilizadas células de carga com sinal de saída variando entre 0 e 2mV. Ao mesmo tempo, o registro de peso dos alimentos teria que ser feito em 3 canais, a uma taxa de 5 amostras por segundo, caso interessasse ao investigador analisar o consumo por bicadas. O registro da luminosidade poderia ser feito em apenas um canal a uma taxa de 1 amostra por minuto, para diminuir a quantidade de dados a analisar.

Para que o sistema saiba como tratar os sinais destes transdutores e como registrá-los sem que o usuário necessite inteirar-se de configurações, é preciso pré-configurar o sistema, criando vínculos entre o parâmetro que será investigado, o transdutor empregado e o tipo de procedimento de registro que deve ser usado. Para isso, desenvolveu-se neste trabalho o conceito de *Módulos de Registro de Parâmetros*, ou seja, um conjunto pré-determinado de transdutor, configuração e aplicativo de registro, orientado à medição de determinado tipo de parâmetro.

De acordo com este conceito, seguindo o exemplo anterior, para o registro de luminosidade existiria o *Módulo de Registro de Luminosidade Ambiente*. Este módulo seria composto pelo transdutor foto-elétrico, já adaptado às características de entrada do sistema, e um aplicativo de registro que se encarregaria da configuração do sistema para o uso deste transdutor. Assim, para o usuário restaria apenas a tarefa de conectar o transdutor e executar o programa de registro, que já teria as ferramentas adequadas para informar e salvar os dados relativos à luminosidade do ambiente.

Em resumo, o trabalho a ser desenvolvido deve ser um sistema, em forma de uma plataforma de *hardware* e *software*, que permita a inserção de diferentes Módulos de Registro, de acordo com o tipo de parâmetro que se deseje investigar, conforme ilustração da Figura 1.

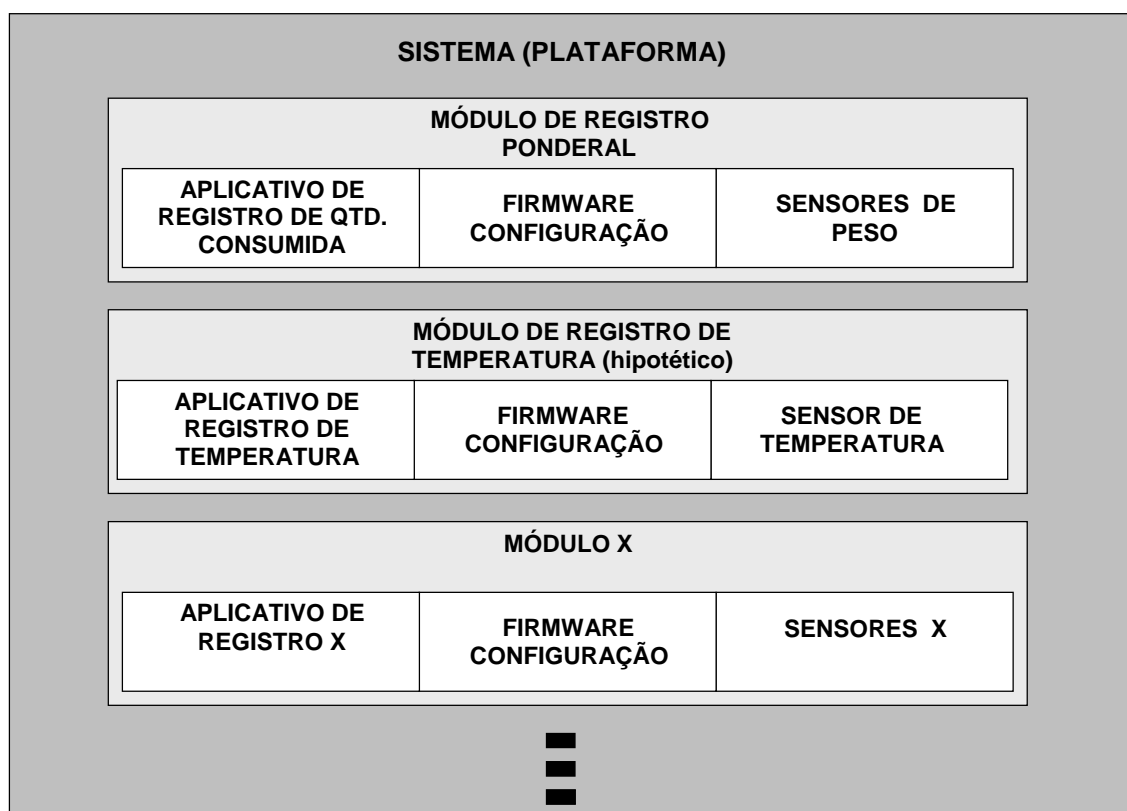


Figura 1 – O sistema desenvolvido é uma plataforma que permite a inserção de módulos, orientados ao tipo de parâmetro de comportamento que se deseja investigar.

Assim, as especificações iniciais para o sistema são as seguintes:

- a arquitetura de *hardware* e *software* deve permitir fácil inclusão de novos Módulos de Registro;
- a operação deve ser simples e isenta de configurações além daquelas de interesse à investigação, ou seja, isento de configurações de *hardware* ou *software*, e
- o custo deve ser o mais baixo possível, respeitando-se as especificações;

Outras características técnicas também serviram como ponto de partida:

- *hardware* flexível a, no mínimo, 10 gaiolas;
- taxa de amostragem variável, até 5 amostras por segundo.

2.1 Delimitação do problema

Como projeto inicial, optou-se pela criação da plataforma do sistema, como descrito anteriormente, e de um Módulo de Registro para os parâmetros ponderais do comportamento ingestivo, já que este é o procedimento de registro mais utilizado em investigações desta ordem, no LNFI.

As especificações iniciais para este Módulo de Registro são as seguintes:

- registro contínuo e simultâneo do peso de quatro tipos diferentes de comida/água, por gaiola em experimento, para até n gaiolas ($n \leq 10$), com resolução mínima de 1 grama em 150 gramas;
- registro à taxa variável, como 5 amostras por segundo, para análise de atributos micro-estruturais (como bicadas) ou como poucas amostras por minuto, para análise de atributos macro-estruturais (como distribuição ao longo do dia);

3. DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA FÍSICA DO SISTEMA

O cenário deste trabalho pode ser representado por dois sistemas, conforme a Figura 2.

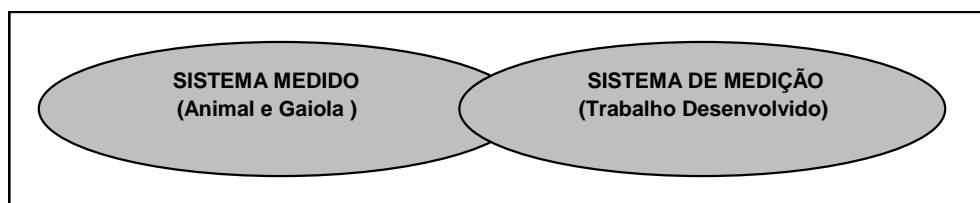


Figura 2– O cenário do trabalho pode ser definido por dois sistemas: um sistema medido e um sistema de medição, que é o trabalho em si.

O sistema medido é composto pelos animais e o ambiente em que eles vivem, sua gaiola. Neste sistema, se deseja medir atributos do comportamento ingestivo do animal, como aqueles citados na introdução.

O sistema de medição, por sua vez, era representado, até então, pelo investigador, que apontava os atributos observados do animal. Agora, este sistema passa a ser representado por um sistema automático, denominado *Sistema Instrumentado para Registro de Comportamentos Ingestivos*, referido adiante como SIRCI, que foi desenvolvido e será descrito neste trabalho.

3.1 Sistema de Medição

“ Medir é o ato de comparar quantitativamente um valor desconhecido de uma grandeza, com um padrão pré-definido de mesma natureza da grandeza que se quer mensurar.” BORCHARDT [21].

Assim, um sistema automático de medição, que dispense o acompanhamento do investigador, necessita dispositivos que amostram a grandeza de interesse no sistema medido e a transformem em uma informação que possa ser processada, para ser devidamente transmitida, comparada e

medida, indicada e, no caso deste trabalho, registrada para análise posterior. A Figura 3 lustra, em blocos, um possível sistema de medição para este trabalho.

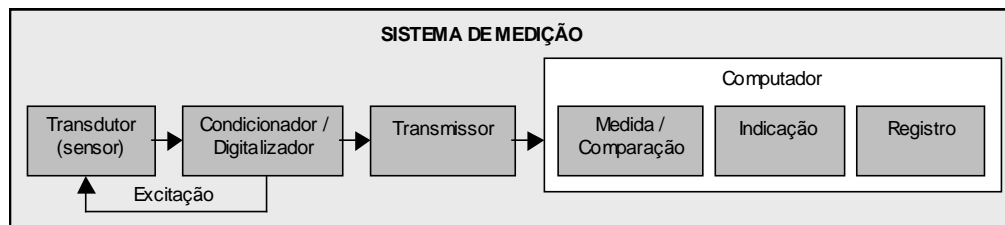


Figura 3 – O sistema desenvolvido pode ser analisado como um sistema de medição, que poderia ter uma estrutura como esta.

O Bloco Transdutor representa os transdutores instalados nas gaiolas, que transformam os parâmetros de interesse - grandezas representativas dos atributos do comportamento, passíveis de medição - em sinais elétricos, guardando uma relação dada pela função de transdução do mesmo. O Bloco Condicionador/Digitalizador, filtra os sinais elétricos os converte em informação digital. Além disto, este bloco fornece uma saída de excitação caso o transdutor necessite, como será visto em detalhes no capítulo pertinente. Finalmente, o Bloco Transmissor envia a informação digitalizada da grandeza adquirida, a um computador que se encarrega dos processos de Medida, Indicação e Registro.

Esta estrutura ilustra o canal de medição para uma dada grandeza no SIRCI. Entretanto, o SIRCI é um sistema flexível à medição de um número variável de grandezas, que podem estar espacialmente distribuídas entre as gaiolas dos animais. Portanto, os blocos da Figura 3 acabaram sendo arranjados em uma arquitetura também distribuída, para atender os requisitos de flexibilidade e qualidade, como será discutido a seguir.

3.2 Arquitetura do Sistema Desenvolvido

As observações dos parâmetros relativos ao comportamento dos animais são feitas geralmente em gaiolas, no caso dos animais do laboratório. Assim, cada gaiola deve estar equipada com os transdutores adequados ao tipo de parâmetro que se deseja medir e registrar. Como as especificações do projeto exigem o registro destas medidas para m transdutores de n gaiolas

simultaneamente, é necessário levar estes $n \times m$ sinais até o computador de registro. Por outro lado, este computador deve estar relativamente afastado das gaiolas, no mínimo, em outro ambiente (outra sala, por exemplo), para que o investigador possa operá-lo sem interferir no ambiente onde a experiência está em andamento, ou seja, para diminuir a perturbação do sistema de medição sobre o sistema medido.

Esta distribuição espacial dos pontos de medida, acarreta em dois problemas sérios. O primeiro é um problema de qualidade de sinal. Pois quanto mais longe se deseja enviar um sinal, menor fica a relação sinal-ruído. Isto acontece porque a partir do ponto onde é gerado, o sinal tende somente a perder sua informação (propriedade análoga à grandeza que representa), em função da imperfeição do meio de condução, enquanto que o ruído, ao contrário, só tende a aumentar com a distância, que expõe este meio a interferências. Por exemplo, um pequeno sinal elétrico (poucos micro-volts) em tensão, como será o caso dos transdutores de peso usados neste trabalho, é atenuado pela impedância do condutor e sofre interferência de ruídos eletromagnéticos que, dependendo da distância, podem ter amplitudes maiores que o próprio sinal [22].

O segundo problema causado pela distribuição espacial dos pontos de medida, é a quantidade de cabos interligando transdutores e computador de registro. Isso compromete a flexibilidade, a organização e facilidade de instalação do sistema. Por exemplo: se um experimento típico, composto por 2 gaiolas com 4 transdutores cada (totalizando 8 transdutores), fosse realizado em uma sala à razoável distância de 10m do computador de registro, seria necessário passar um grupo de 8 cabos blindados (para atenuar interferências) pelas instalações do laboratório, totalizando 80m de cabos. Desejando-se agregar mais uma gaiola ao experimento, mais 40m de cabo teriam de ser passados. A Figura 4 ilustra este sistema hipotético de registro.

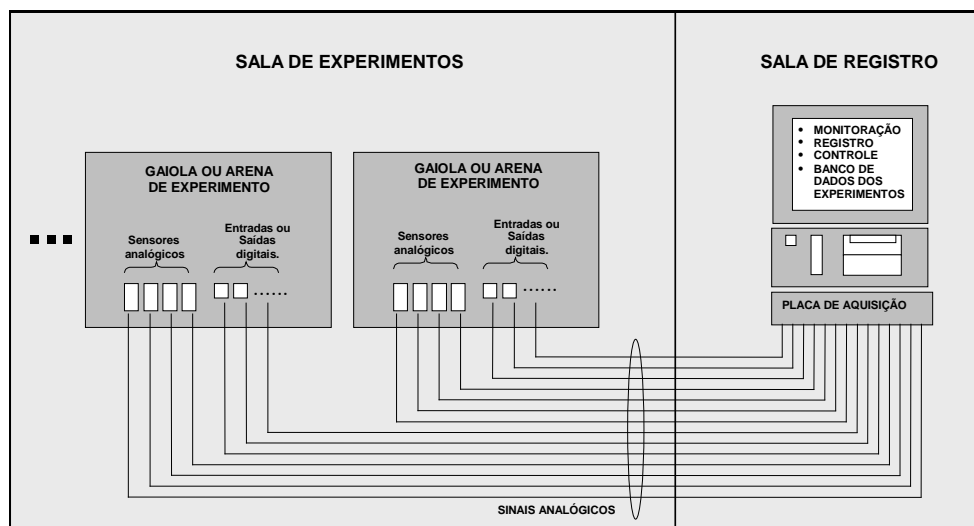


Figura 4 – Uma possível arquitetura para o sistema, porém inadequada por requerer muitas conexões físicas (cabos). Isto pode inviabilizar a medição de sinais analógicos de baixa intensidade, já que o tamanho dos cabos prejudica a relação sinal/ruído.

O primeiro problema citado sugere que, quanto mais perto do transdutor for feita a digitalização do sinal, melhor será a relação sinal-ruído e consequentemente melhor a qualidade do sinal registrado no computador. É claro que esta afirmação considera que no transporte de um sinal digital, a informação está muito menos sujeita à degradação pela distância do que no transporte de um sinal analógico. Neste caso, isso é verdade porque os sinais digitais são representados por níveis bastante distintos das grandezas que transportam a informação. Por exemplo, um dos padrões usado neste trabalho para comunicação digital serial foi o RS-232C. Neste padrão, os níveis lógicos digitais alto e baixo, são representados por faixas de tensão de 10V e a diferença entre eles é de no mínimo 4V (ver Figura 17). Assim, ruídos de 2V de pico, por exemplo, que degradariam em absoluto a informação em um sinal analógico típico (como 0-10V), simplesmente não afetam o sinal digital padrão RS-232C. Além disto, os sinais digitais podem carregar códigos para detecção de erros, como será visto mais adiante.

Assim, para preservar a qualidade dos sinais, decidiu-se que em cada gaiola, que agrupa fisicamente (no espaço) um conjunto de transdutores, deveria haver um dispositivo eletrônico dotado de um conversor analógico digital (A/D), e um microcontrolador, para digitalizar e transmitir os sinais destes transdutores ao computador.

A criação deste dispositivo instalado em cada gaiola possibilitou a solução do segundo problema, o da quantidade de cabos necessária à instalação do sistema, pois permitiu a multiplexação dos sinais de todos os transdutores de uma gaiola para que fossem transmitidos por um único cabo. Este dispositivo foi chamado, portanto, *estação remota de entradas*, ou simplesmente *estação*, como será referido no decorrer deste texto. Obviamente, o fato de digitalizar e multiplexar os sinais localmente demanda a necessidade de um microcontrolador por estação, o que não seria necessário em um sistema centralizado (Figura 4). No entanto, microcontroladores simples, como os que foram usados, custam menos que 10m de cabo blindado, por exemplo.

Neste ponto, poder-se-ia imaginar que o uso de estações na arquitetura do sistema, diminuiria a quantidade de cabos a um por gaiola, conforme a Figura 5.

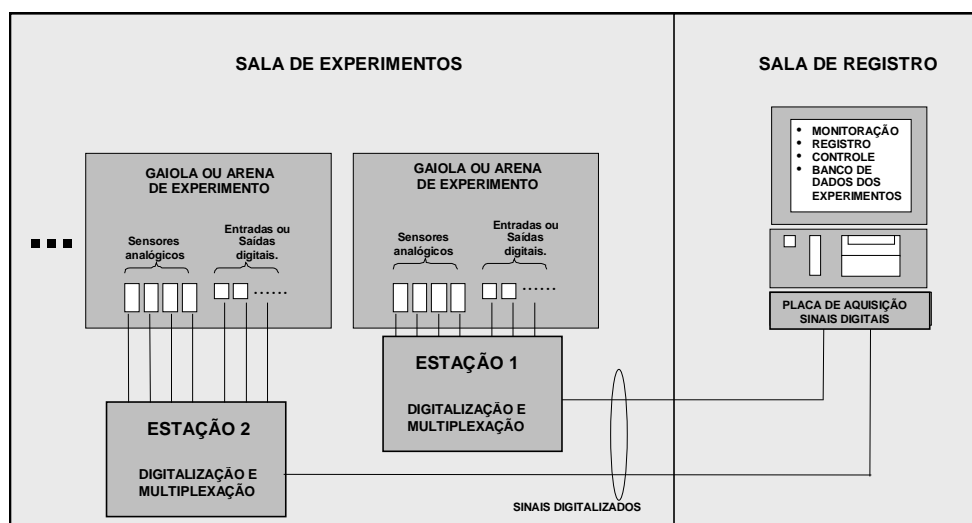


Figura 5– Esta arquitetura digitaliza e multiplexa os sinais no local onde são gerados, diminuindo a quantidade de cabos na instalação e incrementando a qualidade do sinal que chega ao computador.

No entanto, ainda agrega desvantagens quanto à flexibilidade de instalação e quantidade de equipamentos envolvidos no sistema.

Esta arquitetura já melhoraria a organização e a qualidade do sinal medido, conforme explicado anteriormente. Contudo, neste caso, ainda seria necessário o uso de uma placa de entradas no computador, dimensionada para o número máximo de estações (animais em experimento) que supostamente seria necessário nas investigações. Além disto, ainda existiria a necessidade da instalação de um novo cabo para cada nova estação/gaiola agregada ao

experimento, fatores que continuariam comprometendo a flexibilidade e facilidade de utilização deste sistema.

Uma boa solução, para tornar o sistema realmente prático, seria fazer com que os sinais de todas as estações pudessem compartilhar o mesmo cabo (um barramento), e que este barramento levasse alimentação e pudesse ser conectado a uma porta padrão do computador, já existente, como a porta serial RS-232C. Desta maneira, a inclusão de novas gaiolas para experimento, aproveitariam a instalação física existente e não seria necessário nenhum tipo de placa de entrada no computador de registro, conforme a Figura 6.

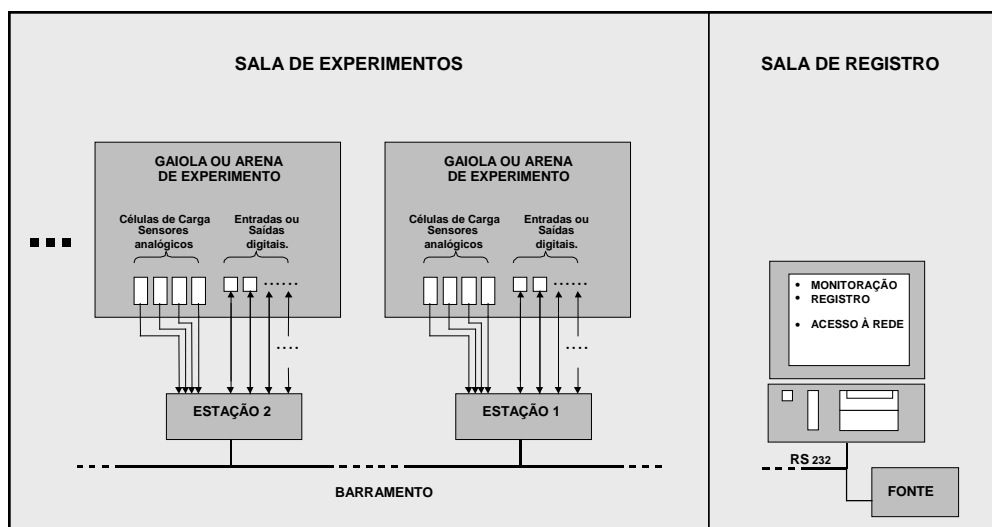


Figura 6 – Arquitetura implementada para conferir maior flexibilidade e economia de instalação. Não é necessária placa de aquisição no computador e todas as estações compartilham o mesmo cabo, que além dos sinais transporta alimentação para o sistema.

Esta idéia demandou o desenvolvimento de um protocolo, para organizar a comunicação entre as estações e computador, já que os sinais de diferentes estações compartilham o mesmo meio de transmissão. Contudo, esta arquitetura demonstrou ser a mais adequada aos objetivos do trabalho e definiu, portanto, o Sistema Automático para Registro de Comportamentos Ingestivos (SIRCÍ). Assim, para construir e validar o sistema foi necessário desenvolver basicamente:

- 2 placas de aquisição, ou estações, com entradas digitais e analógicas;
- um protocolo de comunicação em rede simples, para ser implementado em microcontroladores de baixo custo e fácil aquisição;

- no computador, um serviço de acesso aos dados das estações (e transdutores, conseqüentemente) deixando-se transparente, para a aplicação de registro, o acesso à rede.

A Figura 7 apresenta a mesma arquitetura da Figura 6, representada, porém, sob o ponto de vista de um sistema de medição, como será enfocado adiante neste texto.

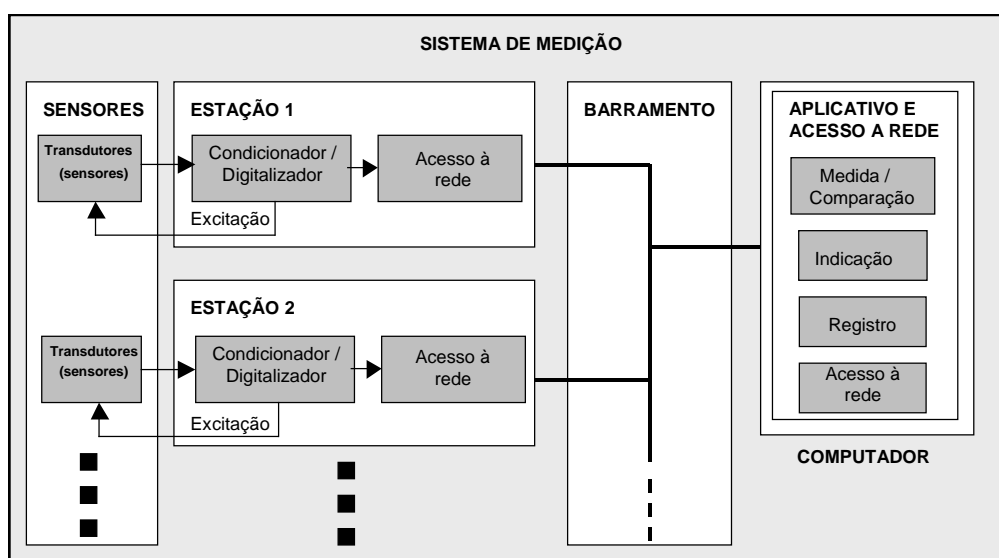


Figura 7 – Arquitetura escolhida, sob o ponto de vista de um sistema de medição.

4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Definida a arquitetura apresentada no capítulo anterior, que atendeu aos quesitos de flexibilidade e facilidade de instalação, procedeu-se o desenvolvimento do sistema, criando os dispositivos do diagrama da Figura 7. São eles:

- transdutores, para registro de parâmetros ponderais;
- estações;
- rede;
- serviço de acesso à rede (no computador e na estação);

Por motivos didáticos, estes dispositivos (lógicos ou físicos) serão explicados separadamente. No entanto, na metodologia para sua criação, não foi possível considerá-los como blocos separados, principalmente por causa das restrições dos três dispositivos centrais (estações, rede e acesso à rede), que eram interdependentes. Assim, nas explicações que se seguirão, não se deve considerar que os dispositivos foram criados nesta ordem, mas sim paralelamente.

4.1 Transdutores

Para este trabalho foram desenvolvidos transdutores do tipo célula de carga [21], como parte de um Módulo de Registro (Figura 1). Contudo, este sistema foi designado para trabalhar com uma variedade grande de tipos de transdutores. Assim, este capítulo fará algumas considerações sobre características que o sistema deve agregar para alcançar esta flexibilidade. Apesar de referências neste capítulo, o desenvolvimento das células de carga será discutido com detalhes no capítulo pertinente ao desenvolvimento do Módulo de Registro de Parâmetros Ponderais.

A arquitetura do sistema, exposta no capítulo anterior, atendeu os objetivos do trabalho que exigiam a criação de um sistema flexível ao número de

animais em observação. Contudo, também foi definido nos objetivos que o sistema deveria ser flexível à medição de diferentes tipos de parâmetros de comportamentos. Considerando que cada parâmetro envolve fenômenos físicos distintos e que para cada tipo de fenômeno e situação pode existir um transdutor distinto; um sistema flexível a diferentes tipos de parâmetros deve ser, do ponto de vista eletrônico (que é o caso deste sistema), flexível a diferentes tipos de transdutores.

Transdutores são dispositivos que transformam a grandeza física que se deseja medir, em uma grandeza cuja natureza seja mais adequada ao processo de medição (condicionamento, transmissão, indicação, cálculo, etc.) [21]. Este trabalho se aplica àqueles transdutores cuja saída é um sinal de natureza elétrica, como impedância, corrente ou tensão. Como sinais elétricos apresentam uma grande flexibilidade ao processamento e grande parte da tecnologia está baseada em dispositivos eletrônicos, existe, no mercado, uma gama grande de transdutores eletrônicos para medições de diversas grandezas físicas [23]. Criar, portanto, um sistema flexível à adaptação de qualquer um destes transdutores seria uma idéia um tanto pretensiosa, contudo, desenvolveu-se um sistema de medição que procurou maximizar esta compatibilidade.

Desenhou-se um sistema com entradas projetadas para sinais em tensão, pois além de se aplicar a todos os transdutores com sinal em tensão, pode-se transformar facilmente em tensão, sinais em corrente (através de um resistor) ou impedância (através de uma ponte). No meio industrial existe, por exemplo, um padrão difundido para sinais de transdutores analógicos cuja saída varia entre 4 e 20mA (denominados de saída 4 a 20mA) [24]. Neste caso, um resistor de 100 Ω em paralelo com a entrada basta para converter este sinal em corrente, para um sinal em tensão, entre 0,4 e 2V (o menor sinal é 4mA para poder identificar circuito aberto, rompimento de cabo ou desconexão, caso a corrente seja 0mA). Se a saída do transdutor for uma variação de impedância, um arranjo em ponte [25] transforma esta variação em variação de tensão, como é o caso das células de carga usadas neste trabalho. Tanto no caso dos transdutores de saída tipo 4 a 20mA, quanto no caso dos transdutores em ponte, e outros, como transdutores integrados diversos, o sistema de medição precisa dispor uma fonte de excitação [21][25].

Procurou-se projetar também um sistema de medição com faixa larga de entrada e alta resolução [26][24]. Pois como não se sabe, *a priori*, as características dos transdutores que podem ser usados, o sistema tem que estar preparado para os dois extremos. A faixa larga determina que a faixa de valores que o sinal do transdutor pode assumir (o maior sinal menos o menor) é larga, enquanto a resolução alta determina que a mínima variação nesta faixa, que o sistema consegue identificar é pequena (a resolução é dada pelo número de divisões identificáveis dentro da faixa, às vezes expressa em bits, no caso de conversores analógico/digitais). Por exemplo, para o caso das células de carga usadas neste trabalho, o sistema de medição teria que ser sensível a variações de pouco micro-volts, e uma faixa de poucos milivolts já bastaria, já que a tensão de fundo de escala das células é menor que 2mV. No entanto, em uma segunda entrada poderia ser colocado um transdutor de temperatura, tipo LM135 (National Semiconductor) que não demandaria tanta resolução, dado seu elevado ganho (10mV/K), no entanto, demandaria uma faixa de quase 4V, para medir temperaturas entre 0 e 100°C.

4.2 Estações

A função da estação no sistema de medição, conforme Figura 8, é condicionar o sinal de transdutores, digitalizá-los se necessário, e enviá-los ao computador através do barramento.

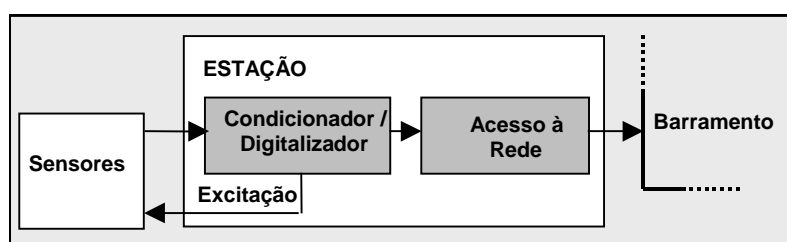


Figura 8 – Função da estação no sistema de medição: condicionar e digitalizar os sinais dos transdutores, e colocá-los em um formato adequado para serem transmitidos no barramento.

O diagrama de blocos do *hardware* necessário a execução deste processo é apresentado na Figura 9 e a seguir se explica o funcionamento de cada um deles.

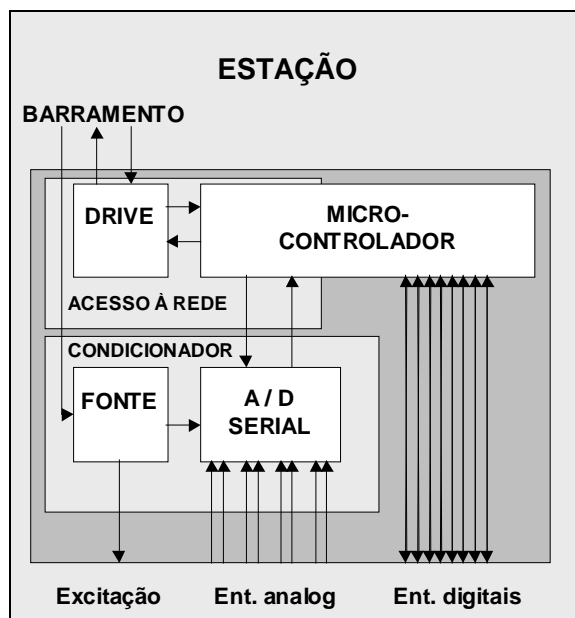


Figura 9 – *Hardware* da estação: um conversor A/D que engloba toda a etapa de condicionamento; um microcontrolador para programar o conversor, ler entradas digitais e executar o serviço de rede e um driver (somente para estação mais próxima ao computador), para transformar os níveis TTL do microcontrolador em RS-232.

4.2.1 Conversor A/D

Condicionar um sinal significa processá-lo para que seja adequado à excitação do estágio seguinte na cadeia de medição, que pode ser um indicador eletromecânico, um voltímetro digital ou um conversor A/D, como é o caso deste trabalho [21]. Tradicionalmente [26], isso é feito através de etapas de condicionamento, como:

- um amplificador de instrumentação, que agregue características como alta impedância de entrada para não atenuar o sinal do transdutor, e alta taxa de rejeição de tensões de modo comum (CMRR) [26][24] devido a ruídos e interferências;
- filtragem ativa, para evitar *aliasing* [26][24] ou remover componentes de frequência que não interessem à investigação ou que possam saturar a entrada do conversor, e
- amplificação e ajuste de zero, para ajustar a faixa de variação do sinal do transdutor à faixa de entrada do conversor.

Neste trabalho, entretanto, utilizou-se um conversor A/D que devido as características apresentadas na Tabela 1 dispensou praticamente todas as etapas de condicionamento citadas anteriormente.

Tabela 1 - Características básicas do conversor A/D.

Conversor ADS1211 (Burr-Brown Products from Texas Instruments)	
Resolução	24 bits
Faixa de entrada	10V (-5 a 5V)
Taxa de amostragem	312kHz
Entradas	4 diferenciais
CMRR	115dB
Impedância de Entrada	4Mohms
Não-linearidade (em relação à faixa de fundo de escala, 10V)	2ppm/Vin ou 4ppm máx

A pré-amplificação do sinal e o ajuste de zero foram dispensados devido à alta resolução e à larga faixa de entrada do conversor. O fato de converter um sinal, com 24 bits de resolução, significa que este A/D pode distinguir 2^{24} valores distintos de tensão de entrada. Assim, dentro de uma faixa de 10V de entrada, poderia medir variações de $10V/2^{24}$, ou seja, $0,6\mu V$. Contudo, através de programação, pode-se dividir esta faixa de entrada por 2, 4, 8 ou 16, melhorando a resolução para até 37nV ($600nV/16$). Apesar de não se conhecer *a priori* todos os tipos de transdutores que possam vir a ser utilizados com este sistema, estas características extrapolam as necessidades de faixa e resolução para inúmeros transdutores, como termopares, transdutores integrados de temperatura, transdutores piezzo-elétricos, ultra-sônicos ou células de carga, como as que foram utilizadas no módulo de registro de pesos, que será descrito posteriormente. O uso de amplificador de instrumentação também foi dispensado porque a impedância das entradas e a taxa de rejeição de modo comum (CMRR) são relativamente elevadas. De fato, alguns transdutores poderiam demandar características distintas não atendidas pelas características de entrada do conversor A/D. Neste caso, onde se necessita uma entrada especial, pode-se usar a fonte de excitação para alimentar um circuito de pré-condicionamento para

estes sinais, que faria parte do transdutor no conceito do Módulo de Registro (Figura 1).

Para explicar porque não foi usado um filtro ativo passa-baixas, para evitar distorções por *aliasing*, é preciso explicar antes o princípio básico de funcionamento deste conversor A/D.

A taxa de amostragem primária do conversor A/D é elevada, de 312kHz, o que evita distorções por *aliasing* para sinais de até 155kHz neste estágio. Como há capacitores na entrada do conversor (100nF), estes devem formar um filtro passa-baixas juntamente com a impedância interna dos transdutores, com frequência de corte bastante abaixo do 155kHz. Por exemplo, a frequência de corte deste filtro é de 26kHz quando se usam as células de carga, cuja impedância interna é de 60Ω. Em transdutores com impedância interna menor, que elevariam esta frequência de corte, deve ser colocado um resistor em série com o sinal.

O diagrama simplificado do processo de conversão do A/D é mostrado na Figura 10.

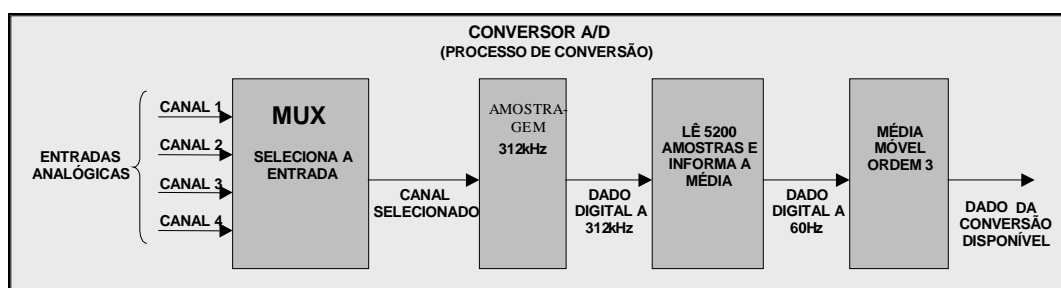


Figura 10 – Processo de conversão: o A/D faz a média de 5200 valores amostrados a 312kHz, na entrada selecionada e gera um dado de saída na taxa de 60Hz, que ainda será aplicado a um filtro média móvel de ordem 3.

O primeiro bloco do conversor é um multiplexador que seleciona a entrada digital em que será feita a conversão. No segundo bloco, o conversor amostra a entrada selecionada em uma frequência de 312kHz. No terceiro bloco, o A/D foi configurado para que a cada 5200 amostras, ou seja, a cada 1/60s (60Hz), faça uma média (de todas amostras) e informe o resultado para o estágio seguinte. Como o conversor faz uma média de todas as amostras contidas em 1/60s, quaisquer componentes de frequência cujo número de ciclos completos caibam inteiros dentro de 1/60 segundos, terão média zero, como é o caso de

componentes em 60Hz, 120Hz, 180Hz, ..., esta configuração promove, portanto, uma filtragem rejeita faixa em todos os múltiplos de 60Hz, conforme Figura 11.

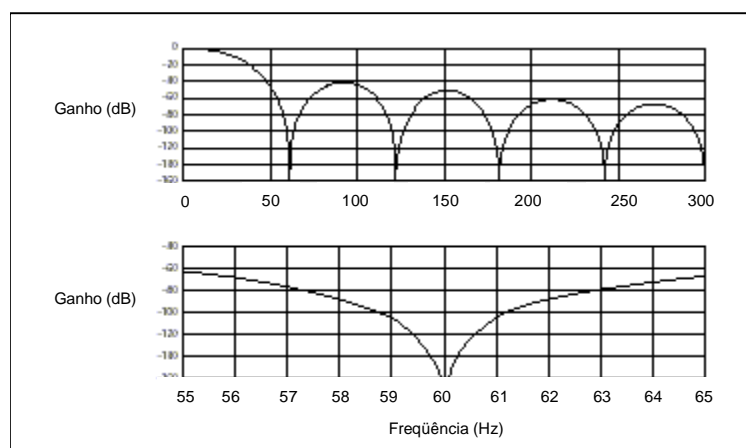


Figura 11 – Resposta do Filtro. Como o conversor efetua a média de todas amostras de um intervalo de tempo de 1/60s, qualquer componente de frequência que possua períodos inteiros neste intervalo apresenta média zero, ou seja um filtro rejeita-faixa em múltiplos de 60Hz.

O último estágio do conversor (ainda na Figura 10) é outro filtro, tipo média-móvel de ordem 3 [27], que incrementa a rejeição a ruídos aleatórios. Este filtro gera um problema que diminui a taxa efetiva de conversão na saída do A/D: quando se troca o canal de entrada e se faz nova conversão, o filtro efetua a média desta conversão, com os dois últimos dados das conversões anteriores que pertenciam a outro canal. Para evitar esta mistura de canais no resultado do filtro, só se pode considerar uma conversão válida, se for a terceira conversão após a troca de canal, pois o filtro estará “cheio” com os dados do mesmo canal. Assim, para cada conversão válida se dispensam duas, conforme o algoritmo da Figura 12. Neste caso a frequência de varredura dos canais fica dividida por três (20Hz) e a taxa de leitura de cada canal fica em 5Hz, já que são quatro canais.

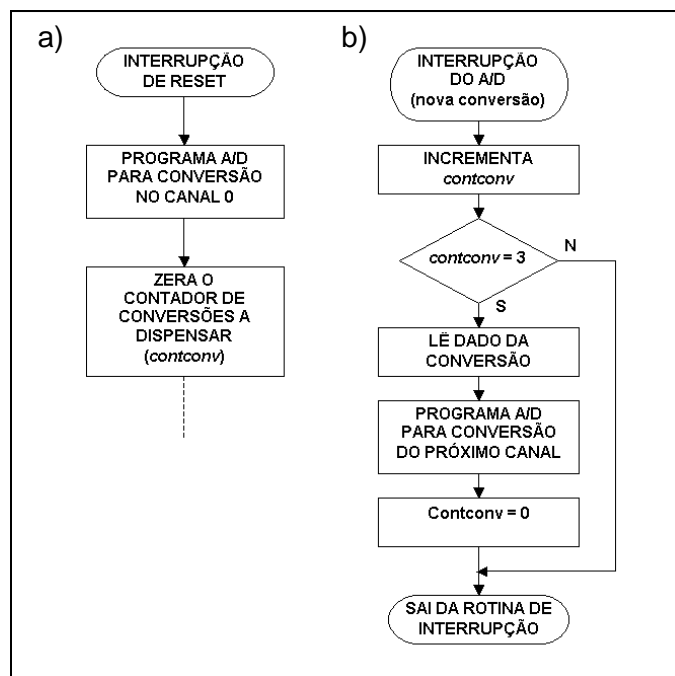


Figura 12 – a) Na inicialização o sistema programa o A/D para converter o Canal 0 de entrada analógica. b) A cada interrupção do A/D (conversão) o algoritmo testa se o valor de saída do filtro digital do A/D é válido para este canal. Se for, o microcontrolador lê este dado e troca o canal do A/D para a próxima conversão.

A resposta do filtro do conversor A/D é válida para frequências de até 155kHz, e como foi explicado, deve-se providenciar uma impedância no transdutor para formar um filtro passa-baixas na entrada e evitar o *aliasing* nesta etapa. No entanto, o dado da conversão é informado a uma taxa de somente a 5Hz por canal, e o filtro não corta frequências imediatamente superiores a 5Hz, como pode ser visto na Figura 11. Assim, qualquer componente acima desta frequência refletirá no espectro abaixo dos 5Hz, de maneira semelhante ao *aliasing* por sub-amostragem que não é exatamente o problema aqui. Contudo, as estações foram designadas para observação de sinais contínuos, ou, no máximo, variações rápidas, não periódicas, como a interrupção de uma foto-célula, uma bicada na célula de carga por exemplo. No caso de surgir a necessidade de observação de parâmetros representados por sinais periódicos deve ser avaliada a inserção de um filtro ativo no transdutor que comporá o Módulo de Registro para este parâmetro.

Além destas características, este conversor agrega alguns outros recursos, como seleção e geração própria da taxa de conversão, rotinas de auto-calibração,

seleção de faixas de entrada, referência interna de tensão, entre outros, conforme seu *data-sheet* [28]. Em troca destas facilidades, contudo, é necessária uma pré-configuração de seu modo de funcionamento, que é realizada pelo microcontrolador da estação, através da mesma porta serial que é usada para ler os dados da conversão dos canais de entrada analógica.

4.2.2 Fonte

A fonte de alimentação do circuito é formada por um regulador que rebaixa a tensão de aproximadamente 12V, do barramento, para 5V que será utilizada pelos circuitos analógicos e digitais e para a excitação dos transdutores. Os circuitos digitais geram um ruído considerável na fonte de alimentação [29]. Isto acontece porque eles demandam surtos de correntes elevadas (em curtíssimos intervalos de tempo). Devido à impedância das trilhas que os alimentam, estas correntes podem gerar oscilações de tensão na alimentação, como 100mV, por exemplo. Enquanto um ruído de 100mV pode ser insignificante para um circuito digital alimentado com 5V, ele causaria um ruído de aproximadamente 50 μ V na conversão do A/D usado neste trabalho, dada sua taxa de rejeição à fonte de alimentação (PSRR, *Power Supply Rejection Ratio*), da ordem dos 73dB. Por isso, o fabricante do conversor A/D disponibiliza duas entradas de alimentação, uma para a parte analógica do conversor e outra para a parte digital, de forma que o projeto possa prever dois circuitos independentes de alimentação. Dado este panorama, alguns cuidados foram tomados no projeto do circuito de alimentação e no desenho da placa de circuito impresso, para minimizar a influência dos ruídos da parte digital sobre a analógica:

- foram usados capacitores cerâmicos (baixa indutância parasita) junto aos terminais de alimentação dos circuitos integrados digitais, para diminuir os surtos rápidos de corrente na fonte;
- foram usados filtros RC, com capacitores eletrolíticos ou de tântalo, também junto aos terminais de alimentação dos circuitos integrados digitais, para diminuir seu acoplamento com a fonte;

- foram usados planos de referência (GND), ao invés de trilhas e trilhas largas de alimentação (Vcc), para diminuir suas impedâncias e minimizar as oscilações em tensão causadas pelos surtos de corrente;
- planos de GND, analógico e digital, e trilhas de Vcc foram separados, para não fornecer caminho aos surtos de correntes digitais, pelos circuitos analógicos,
- como o conversor A/D necessita unir os planos de GND (digital e analógico) internamente, por uma questão de referência, este foi o único ponto escolhido para unir os dois circuitos de alimentação e conectá-los ao regulador da fonte.

Estes detalhes podem ser vistos no esquema eletrônico da estação (Anexo 1) e no desenho da placa de circuito impresso (Anexo 2).

O circuito da estação disponibiliza também duas fontes de excitação para transdutores. Uma interna ao conversor A/D, cuja tensão é relativa à tensão de referência ($1,3 \cdot V_{ref}$) e tem capacidade de corrente de 10mA. Outra é a própria fonte analógica do circuito, com capacidade teórica de 1000mA, limite do regulador, que dependerá do dissipador de calor usado. Quando a fonte do circuito analógico é usada como fonte de excitação, a entrada de referência do conversor A/D é conectada a uma derivação desta fonte, para evitar erros de conversão quando se usam transdutores com configuração interna em ponte.

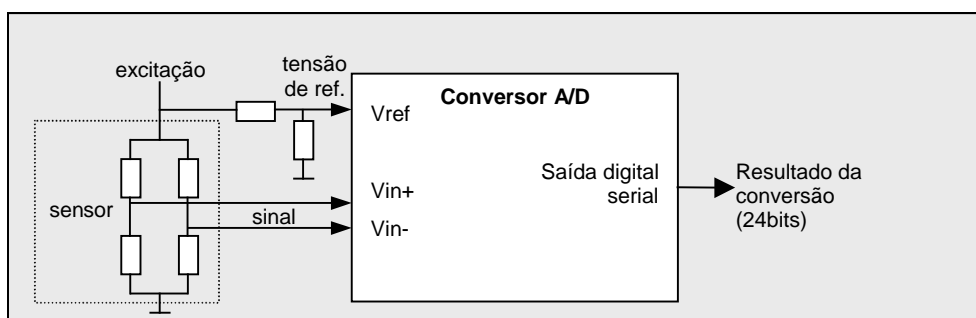


Figura 13 – Configuração usada para referência de tensão. Se a tensão de excitação variar, por algum efeito indesejado, a amplitude do sinal e da referência variam na mesma proporção, não alterando a relação entre si, consequentemente, não alterando o valor da conversão.

Em uma ponte, o sinal de saída (desbalanço) varia diretamente com a tensão de excitação [25]. Com a configuração da Figura 13, se a tensão de excitação variar (por efeito de temperatura ou carga, por exemplo), o sinal do

transdutor e a tensão de referência variam na mesma proporção, ou seja, não mudam a relação entre si, e portanto não muda o resultado da conversão do A/D. Assim, esta configuração minimiza o efeito deletério de variações da excitação, ou variações de outras referências (quando são usadas) na medida. Entretanto, se o transdutor utilizado for de tipo absoluto, cujo sinal não depende de excitação externa, pode ser usada uma tensão de referência interna do A/D, habilitada por software.

4.2.3 Microcontrolador

O microcontrolador que controla o funcionamento da estação é o 89C2051 [30] (Atmel Corporation) compatível com a família MSC®51 (Intel Corporation) [31]. Sua função na estação é configurar o modo de funcionamento do conversor A/D, ler os dados das conversões (entradas analógicas), ler as entradas digitais e, por fim, executar o serviço de acesso à rede (rotinas responsáveis por enviar estes dados, através do barramento, ao computador). Para isso, este componente possui dois recursos importantes:

- interrupção externa [32], usada pelo conversor A/D, para solicitar comunicação quando existe um novo dado de conversão
- porta serial *full-duplex* [31] usada para a comunicação com a rede, que também pode gerar interrupção na recepção, sinalizando ao processador que há um dado novo para ser tratado, ou no final da transmissão de um dado, sinalizando que outro dado pode ser enviado para transmissão.

O processador do microcontrolador é programado para atender, de maneira preemptiva [20] estas duas interrupções: a interrupção da porta serial, de maior prioridade, que chama a rotina responsável pelo serviço de rede, e a interrupção externa (requisitada pelo A/D), que chama a rotina de leitura das entradas digitais e analógicas (através de comunicação com o A/D). A Figura 14 ilustra estas tarefas executadas pelo processador e a maneira como elas se comunicam.

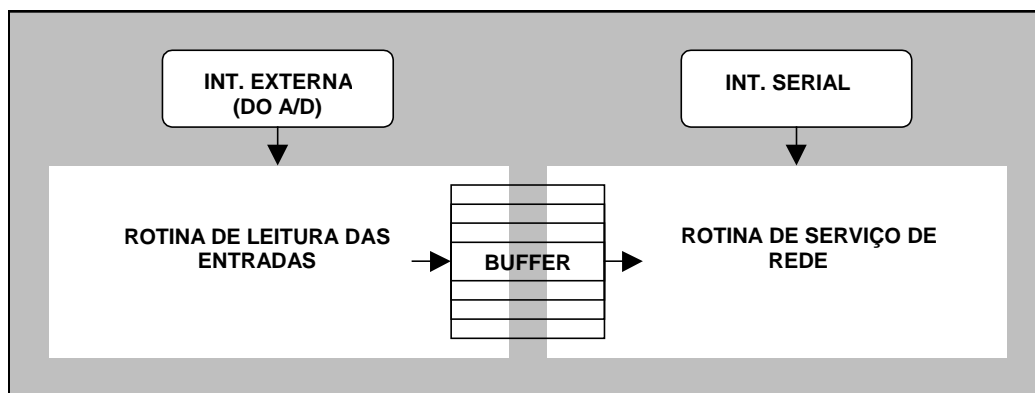


Figura 14 – O processador executa duas tarefas básicas, chamadas por interrupção: 1) rotina de leitura das entradas, chamada pelo A/D (quem gera a taxa de amostragem) e 2) rotina de rede, chamada pela porta serial (quando recebeu ou quando está pronta para transmitir). A comunicação entre as tarefas é feita através de um buffer.

O pedido de interrupção do conversor A/D é gerado a cada nova conversão, a uma taxa de 60Hz, programada logo após o *reset* (inicialização). Ele chama uma rotina que se encarrega de ler a amostra de um canal, trocar o canal para a próxima conversão e dispensar as conversões necessárias para encher o filtro do A/D conforme já foi explicado. Depois da leitura dos quatro canais analógicos, a rotina salva estes dados em um *buffer* (onde o serviço de rede os processará para transmiti-los ao computador). Caso já tenham sido feitas 400 conversões (20s), o processador volta a se comunicar com o A/D para habilitar a rotina de auto-calibração [28].

O serviço de rede também é chamado por interrupção, sempre que a porta serial do microcontrolador termina de enviar um byte ou quando recebe um byte completo da rede. Este serviço se encarrega de enquadrar os dados gerados na estação, nos moldes do quadro definido pelo protocolo de rede (Figura 18), e transmiti-los ao computador, além de gerenciar a retransmissão de dados de outras estações, como será visto a seguir, no item Rede.

4.3 Rede

Segundo a concepção de TANENBAUM [33], uma rede é um conjunto de dispositivos autônomos interconectados, enquanto que um protocolo é um conjunto de regras sobre o modo como se dará a comunicação entre as partes

envolvidas. Neste trabalho, as estações não podem ser consideradas autônomas, porque elas não fazem sentido no sistema de medição se não existir o computador que informa e registra as medidas. Por isso, talvez fosse mais adequado se referir aos dispositivos que tornam possível a interconexão das estações como um protocolo de barramento, denominação usada para “redes” semelhantes a esta, no meio industrial. No entanto, este trabalho mistura conceitos de alto nível, como estes citados acima, com conceitos de baixo nível, de *hardware*, onde barramento significa apenas um meio físico de transporte ou comunicação, comum a diversos dispositivos. Como o protocolo de comunicação desenvolvido neste trabalho especifica, além do meio físico, dispositivos virtuais (serviços de *software* que permitem ao computador de um lado, e à estação de outro, se comunicarem), optou-se por referi-lo como um *protocolo de rede*. Enquanto que o termo *barramento* continuará significando apenas o meio físico, ou seja, o cabo que transporta dados e alimentação entre estações e computador.

4.3.1 Modelo de referência ISO-OSI

O motivo do desenvolvimento de um protocolo de rede neste trabalho foi permitir que todas estações, que estão transmitindo seus dados ao computador, possam fazê-lo através do mesmo meio de transmissão, pelos motivos de flexibilidade e facilidade de instalação, conforme já foi abordado. Este protocolo deve estabelecer então regras, como em um acordo, que os participantes da rede devem seguir para estabelecer comunicação entre si. Estas regras envolvem problemas bastante distintos, como, por exemplo: qual será o meio físico que os participantes usarão; como será representado o nível lógico 1; qual será a taxa de comunicação; como se tratarão erros de comunicação; como se mandará a informação referente a quem se destinam os dados, etc. Para diminuir a complexidade deste problema, é comum dividir o protocolo de rede em camadas, cada uma com uma tarefa bem definida. Neste trabalho procurou-se desenvolver o protocolo com base no modelo de camadas ISO-OSI (International Standards Organization – Open Systems Interconnection) [33], que foi uma proposta de padronização internacional visando facilitar a interconexão e interpretação dos sistemas que a seguissem.

O modelo ISO-OSI foi dividido em sete camadas, das quais o protocolo deste trabalho implementa quatro, de acordo com a Figura 15.

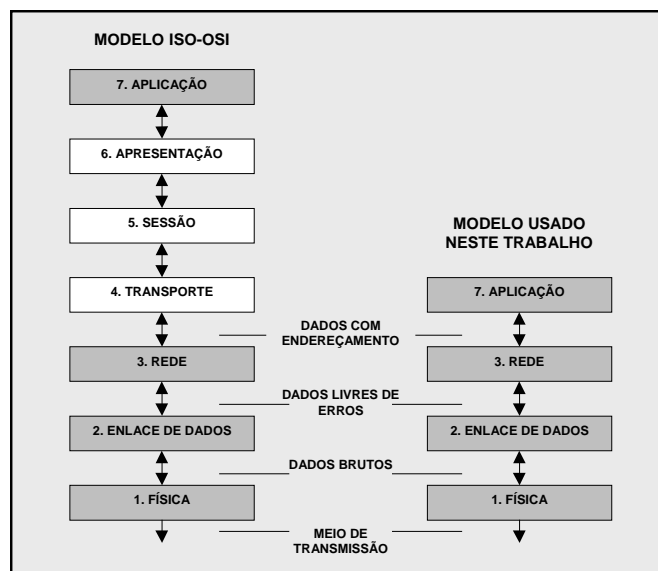


Figura 15 – Protocolo de rede dividido em camadas. Cada camada presta um serviço definido à camada superior.

A função de cada camada no sistema é executar uma tarefa bem definida, como se fosse um serviço prestado à camada superior, diminuindo o grau de abstração do sistema. A camada 1 (Física) se encarrega das regras sobre a transferência de bits entre um ponto e outro na rede. Assim, a camada imediatamente superior (Enlace de Dados), não necessita se inteirar de como será feita a transmissão: se por cabo, fibra óptica, rádio, etc., pois esta é uma tarefa da Camada Física. Da mesma maneira que a Camada de Rede não se preocupa em verificar se houve erros de transmissão, pois este é um serviço da Camada de Enlace de Dados, que oferece uma conexão livre de erros. Por fim, a Camada de Rede se encarrega do serviço de conexão, ou entrega no endereço certo. Assim, se o aplicativo de registro dos parâmetros ingestivos (Camada de Aplicação) deseja ler dados da estação 2, ele passa apenas este parâmetro (endereço da estação), e a Camada de Rede se encarrega de entregar os dados respectivos.

As três camadas entre a Camada de Rede e a Camada de Aplicação, sugeridas pelo modelo ISO-OSI (Transporte, Sessão e Apresentação) não se aplicam às necessidades deste trabalho.

4.3.2 Escolha da Topologia

Quando diversas emissoras de televisão transmitem seus programas através do mesmo meio (o espaço), as informações não se confundem porque estão codificadas (moduladas) em frequências distintas, os canais de TV [34]. As estações do SIRCI, no entanto, como computadores conectados à Ethernet transmitem seus dados em banda base [33], ou seja, diretamente, sem modulá-los em uma frequência específica. Quando diversos dispositivos tentam usar o mesmo meio para transmitir dados em banda base, há que fazê-lo um de cada vez, pois dois dispositivos transmitindo juntos causariam conflito de informações. Assim, um dos problemas básicos para o protocolo de comunicação é distribuir, no tempo, o direito de utilização do meio a todos os dispositivos que querem usá-lo. Quando esta distribuição é organizada, cria-se um segundo problema: o computador, por exemplo, que está escutando o meio (recebendo dados), tem que saber de quem vieram os dados que estão trafegando naquele momento. Isso demanda a necessidade de uma identidade única para cada membro da rede, que deve ser enviada junto com os dados para identificar sua origem. Se os membros forem todas estações iguais, há que se programar um número de série distinto em cada uma, ou elaborar um algoritmo que arbitre um endereço por ordem de conexão ou outro critério que distinga uma estação da outra.

Neste trabalho, estes problemas de arbitragem de barramento e identificação da estação foram resolvidos com a escolha da topologia da rede, conforme a Figura 16.

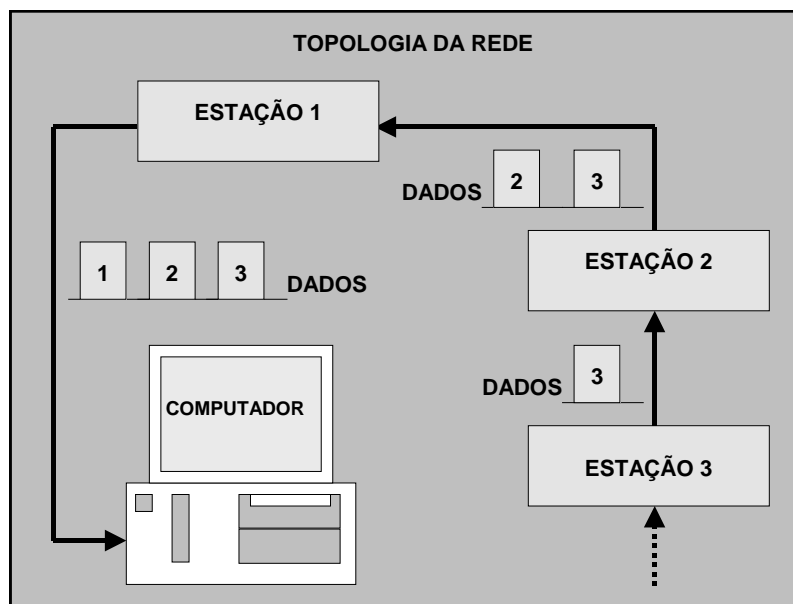


Figura 16 – Topologia da rede usada no SIRCI: o tráfego de quadros aumenta a medida que se aproxima do computador, contudo, cada estação possui um meio exclusivo de transmissão, e não é necessário arbitrar o direito de uso do barramento.

Apesar de ser um único cabo que percorre todas as estações, nesta topologia não é necessário um algoritmo de arbítrio ou controle de acesso ao barramento, pois cada estação possui um meio exclusivo de transmissão. Cada estação recebe os dados das estações anteriores, anexa seus dados, e transmite à estação seguinte. Este processo se repete de estação em estação, até chegar no computador. Esta topologia aumenta o tráfego (quantidade de dados) nas estações, à medida que elas se aproximam do computador (ver Figura 16), mas isso não foi um problema para os requisitos de velocidade do sistema. Uma estação transmite um quadro a cada 200ms (5Hz), e cada quadro, que contém 200 bits, ocupa um espaço de tempo de 10,4ms (a 19200bps). Assim, o limite teórico de ocupação no barramento, cujo gargalo está entre a última estação e o computador, seria de 19 quadros, ou 19 estações conectadas ao sistema.

Além de resolver o problema de compartilhamento do meio, esta topologia resolveu também o problema de endereço na rede. Os dados que são gerados em cada estação, levam, entre outras informações, um campo que contém o endereço de origem. Este endereço, contudo, é sempre 00 (zero) inicialmente, mas a cada estação que este quadro passa, este endereço é incrementado. Desta

forma, se o computador receber um quadro cujo endereço é 03, saberá que pertence à quarta estação conectada ao sistema, por exemplo.

4.3.3 Camada Física

Este trabalho usou dois padrões de conexão física no protocolo de rede: RS-232C [16], e TTL [35].

Para a comunicação entre o computador e a primeira estação utilizou-se o padrão RS-232C, originalmente aprovado pela EIA (Electronic Industries Alliance) para a conexão entre dispositivos seriais, existente em qualquer computador padrão IBM-PC, até o momento. A especificação inicial previa taxas de 19200bps para distâncias de 15,24m, contudo, as portas seriais que existem hoje nos computadores, simplesmente chamadas RS-232, estão de acordo com revisões mais recentes desta norma, como a EIA-232-D (1987), ou a EIA/TIA-232-E (1991), união da EIA com a TIA (Telecommunications Industry Association). Estas revisões aumentaram as taxas de transmissão e flexibilizaram a questão das distâncias, já que isso depende também de protocolos de detecção e correção de erros, não especificados pela norma. O uso deste padrão demandou a necessidade de um *driver* (MAX233, Maxim Integrated Products) [36] na primeira estação, que transforma os níveis de tensão TTL (padrão do microcontrolador) para os níveis RS-232 (padrão da porta serial do computador), conforme Figura 17.

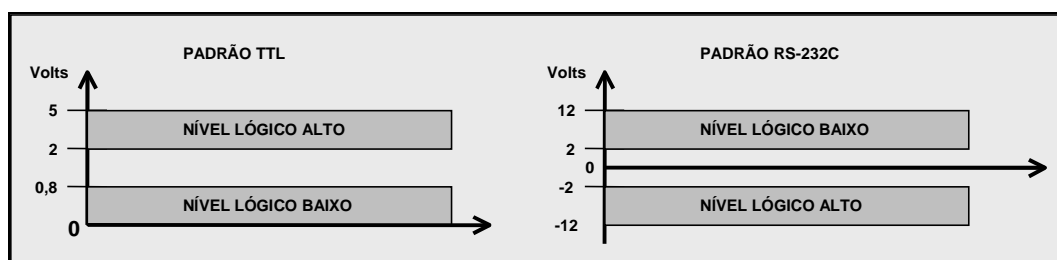


Figura 17 – Padrão de tensões TTL e RS-232C.

Neste trabalho, adotou-se uma taxa de transmissão de 19200bps, pois como foi explicado anteriormente, é suficiente para conectar até 19 estações, além do que se necessita para o sistema. O padrão de comunicação usado entre as estações foi o TTL, para eliminar a necessidade de outros drivers. Apesar

destes sinais não serem tão imunes a ruído quanto os sinais RS-232, há relatos de sua utilização em distâncias entre 3 e 30m [22]. Além disto, a distância entre uma estação e outra não será tão grande quanto a distância entre o computador e a última estação, já que todas devem estar em um mesmo ambiente.

4.3.4 Camada de Enlace de Dados e Camada de Rede

Como foi colocado anteriormente, a Camada de Enlace de Dados e a Camada de Rede, servem, respectivamente, para tratar os erros de comunicação e proporcionar a conexão entre dois dispositivos da rede. Para isso, é necessário enviar juntamente com os dados propriamente ditos (como o valor das entradas da estação), alguns bits a mais que acrescentam códigos para detecção de erro e códigos de endereço. O quadro, este conjunto de bits de controle mais os dados, usado no protocolo desenvolvido para este trabalho, é apresentado na Figura 18, e logo a seguir se explica a função de cada campo.

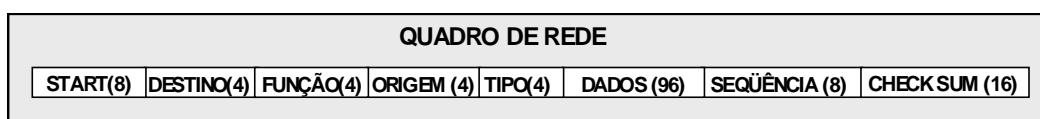


Figura 18 – Formato do quadro de rede.

START: é um campo de 8 bits que sinaliza o início do quadro. As rotinas de enquadramento procuram por este campo para sincronizar a recepção.

DESTINO: contém o endereço do dispositivo a quem se destinam os dados, neste caso, sempre o computador.

FUNÇÃO: informa ao destino para que servem os dados que estão sendo transmitidos (não implementado neste trabalho).

ORIGEM: contém o endereço de quem enviou os dados. Este é o campo que é incrementado a cada estação que o quadro passa.

TIPO: informa o tipo dos dados, por exemplo, entradas analógicas ou digitais.

DADOS: são os dados das entradas, analógicas e digitais, ou dados sobre outros parâmetros que podem ser identificados no campo TIPO.

SEQÜÊNCIA: este campo é incrementado a cada novo quadro transmitido pela estação. Caso ocorra uma perda em rajada de diversos quadros, esta informação permite ao computador saber quantos quadros foram perdidos.

CHECK SUM: depois de gerar todo o quadro, a estação aplica um algoritmo a todos os bits. Este gera uma soma de verificação, que será usada na recepção para saber se não ocorreram erros em algum dos campos, durante a transmissão. Existem diversos algoritmos consagrados, que aplicam funções polinomiais, como CRC16 [33][28], no entanto, neste trabalho foi usada uma soma simples.

4.4 Serviço de acesso à rede

O Serviço de Acesso a Rede foi o nome dado ao conjunto de dispositivos físicos e virtuais que permite às estações por um lado, e ao computador por outro, comunicarem-se através da rede, sem inteirar-se das tarefas necessárias para isto. Em outras palavras, este serviço nada mais é do que a implementação das Camadas 1, 2 e 3 do protocolo de rede, nas estações e no computador, conforme a Figura 19.

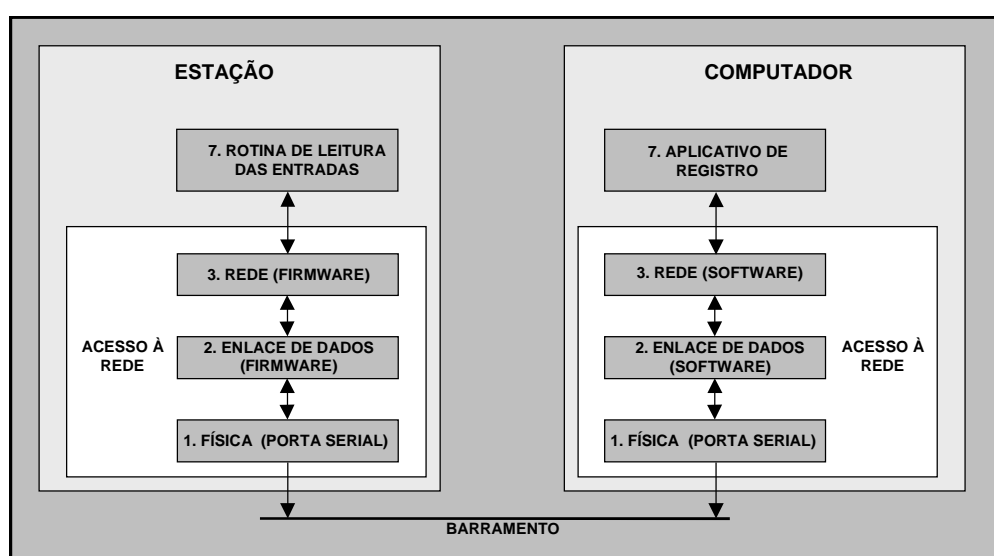


Figura 19 – A rotina de leitura das entradas (nas estações) simplesmente entrega seus dados ao Serviço de Acesso a Rede, enquanto que o aplicativo de registro (no computador) simplesmente pede o dado da estação desejada para o Serviço de Acesso a Rede. Ambos não precisam inteirar-se das tarefas necessárias à comunicação.

4.4.1 Serviço de Acesso à Rede nas Estações

Como já foi visto, nas estações, a cada 200ms (5Hz) o conversor A/D chama uma rotina de interrupção que lê as entradas analógicas e digitais e escreve seus dados em um *buffer*, para serem transmitidas ao computador (Figura 14). O Serviço de Rede monta o quadro de rede (Figura 18) com os dados deste *buffer*, e o coloca em uma pilha de saída, que a porta serial se encarrega de transmitir.

Assim, nas estações, as Camadas 3 e 2 são códigos que colocam os dados das entradas analógicas e digitais no formato do quadro de rede. A Camada 1 é a porta serial do microcontrolador. Esta porta é *full-duplex*, ou seja, pode receber e transmitir simultaneamente. O processo de transmissão ou recepção funciona independentemente do processador. No entanto, este deve ser informado quando um byte foi recebido pela porta serial, ou quando a porta serial está livre para nova transmissão. Por isso, toda vez que um byte é recebido, ou um byte acaba de ser transmitido, a porta gera um pedido de interrupção. Se foi uma recepção, a rotina desta interrupção deve ler o byte recebido de um registrador de recepção. Existe um *buffer* de recepção de 1 byte, o que significa que a leitura deve ser feita antes da chegada do próximo byte. A uma taxa de 19200bps, há 520µs para efetuar esta leitura, caso contrário, o novo byte sobrescreve o antigo no registrador. Se, por outro lado, a interrupção da porta serial foi referente a uma transmissão, significa que o último bit (*stop bit*) do byte que estava no registrador de transmissão foi enviado, e que, portanto, a porta está livre para transmitir outro byte.

O uso de interrupções otimiza o aproveitamento de tempo do processador, pois permite que periféricos (porta serial e conversor A/D, neste caso) solicitem processamento quando necessitam, interrompendo a rotina corrente e passando para uma rotina que os atenda. Assim o processador não necessita fazer *polling* [32], processo em que consulta periodicamente os periféricos para verificar se necessitam de comunicação.

4.4.2 Serviço de Acesso à Rede no Computador

No computador, a Camada Física da rede constitui a porta serial RS-232, conforme já explicado. Já as camadas 2 e 3, por sua vez, foram desenvolvidas em uma rotina, que recebe os dados da porta serial, identifica e desmonta os quadros da rede, e aloca dinamicamente um *buffer* à medida que estes dados estão chegando. Este *buffer* é a interface para qualquer aplicativo que deseje ler os dados das estações. Seu formato é apresentado na Figura 20.

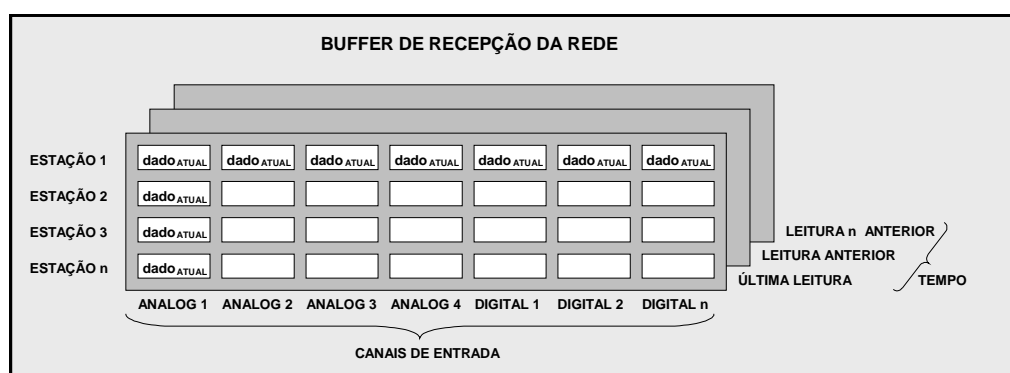


Figura 20 – Formato do *buffer* criado pelo Serviço de Acesso a Rede no computador. Este *buffer* é a interface da rede para os aplicativos.

Neste caso também foram tomados cuidados para evitar a leitura da porta serial através de *polling*. A rotina de recepção é uma *thread* [37] (rotina que roda paralelamente a outros processos), que só roda quando há uma interrupção de *hardware* da porta serial. Como esta rotina foi desenvolvida para o sistema operacional Windows 95, isto foi feito da seguinte maneira:

- criou-se uma *thread* para tratar os dados da recepção e organizá-los no *buffer*, que será a interface com os aplicativos;
- criou-se um evento relacionado à interrupção de recepção, da porta serial escolhida para a comunicação com a rede, e
- condicionou-se a execução da *thread* à ocorrência do evento.

Assim, esta *thread* implementa as Camadas 2 e 3 do protocolo de rede. Ela foi desenvolvida na forma de uma classe [38], o que facilita seu uso por qualquer aplicativo que tenha que acessar a rede.

5. ANÁLISE DO ERRO DO SISTEMA

O sistema desenvolvido, como foi descrito até agora, é capaz de ler os sinais de diferentes tipos de transdutores, em diferentes gaiolas distribuídas no espaço, e os disponibilizar de forma organizada em um *buffer* de memória no computador. No computador, algum aplicativo completará o processo de medição, informará e registrará estes sinais da maneira mais adequada ao tipo de parâmetro que eles representam.

Contudo, estes sinais disponibilizados pelo sistema carregam um erro, em função dos erros inerentes a seus sub-sistemas. A margem de erro expressa quanto o valor indicado pode ser diferente do valor real, ou seja, a margem de confiança da medida. Ela é tão importante na medida quanto o próprio valor atribuído à grandeza, pois define se o sistema de medição é suficiente ou não para o que se propôs.

Para definir-se o erro de um sistema de medição, faz-se uma análise de como se propagam os erros de seus subsistemas [21][26]. No SIRCI, entretanto, todo o processo executado com o sinal do transdutor, até sua digitalização, é efetuado em um único componente. Se o sinal digital for considerado livre de erros, como já foi discutido, a definição do erro do sistema, sem o transdutor, se resume ao desempenho do conversor A/D.

Um conversor A/D genérico, é um dispositivo que compara a tensão em sua entrada (V_{in}) com uma tensão de referência (V_{ref}) e gera um código digital que expressa numericamente a proporção entre estas tensões. No caso do conversor usado neste trabalho, Figura 13, a tensão de entrada é diferencial, ou seja, V_{in} é interpretada como a tensão na entrada Positiva, V_{in+} , menos a tensão na entrada negativa, V_{in-} , ou seja, $V_{in} = V_{in+} - V_{in-}$. A mínima tensão aceita na entrada deste conversor é $-2*V_{ref}$ e a máxima é $2*V_{ref}$. Como ele usa 24 bits para representar a conversão, idealmente, a tensão mínima de entrada é convertida para 000000H, a tensão máxima é convertida para FFFFFFFH, e estes dois pontos definem uma função de conversão linear para qualquer V_{in} dentro desta faixa, conforme Figura 21.

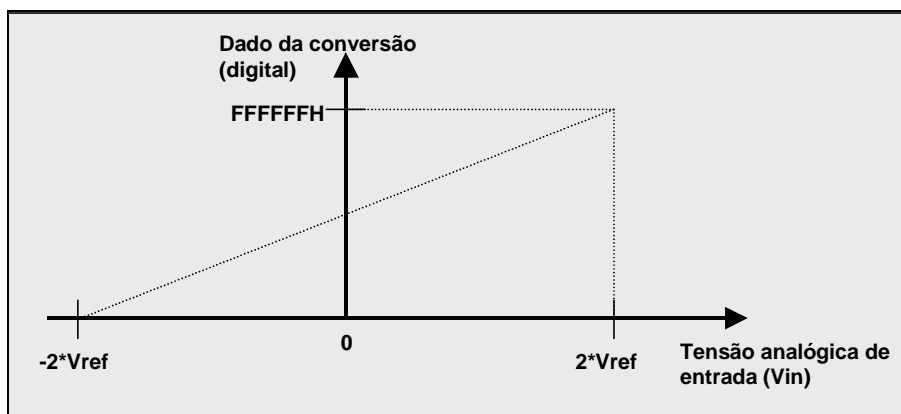


Figura 21 - Função de conversão ideal do A/D: tensões de entrada entre V_{min} e $V_{máx}$, são convertidas linearmente para representação digital entre 00H e FFFFFFFH.

Na prática, no entanto, esta função de transferência não é exatamente linear, ou seja, ela insere uma série de erros na conversão do sinal de analógico para digital. Alguns destes erros são de origens conhecidas e passíveis de correção; outros são incertezas oriundas de fenômenos aleatórios (como ruídos) ou não modeláveis e não podem ser corrigidos.

Para definir o erro total do conversor, é necessário contabilizar todos os erros aos quais ele está submetido (Figura 22). Para isso, cada uma das fontes de erro será discutida a seguir.

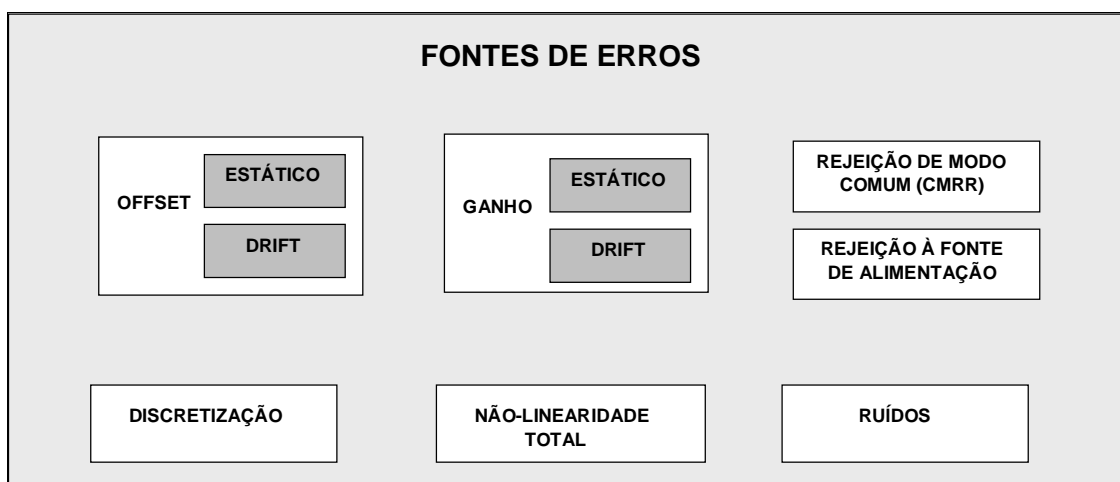


Figura 22 – Tipos de erros que o conversor A/D pode agregar na conversão.

5.1 Erros de *offset* e ganho

Tanto o erro de ganho quanto o erro de *offset*, são discrepâncias estáticas da curva de conversão ideal, ou variações com a temperatura (*Drift*), conforme a Figura 23.

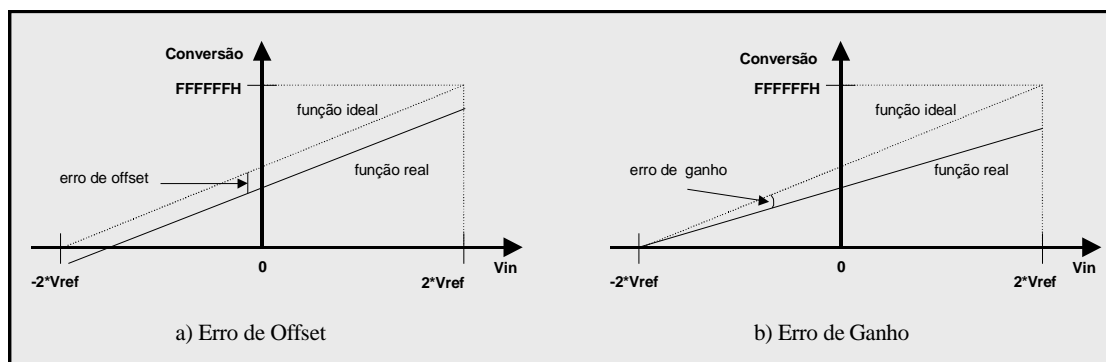


Figura 23 – Erros de *offset* e ganho. O erro de *offset* causa uma mudança no coeficiente linear da reta (soma um valor de erro ao valor real da conversão). O erro de ganho muda o coeficiente angular da curva (multiplica o valor da conversão por um fator de erro.)

Em qualquer um destes casos, no entanto, estes erros podem ser compensados com uma calibração automática que o conversor efetua a intervalos pré-determinados de tempo, mais rápidos que possíveis variações de temperatura no componente, capazes de gerar *drifts* significativos nas medidas.

O processo de calibração consiste em estabelecer-se tensões de entrada conhecidas, para que seja possível arbitrar seus valores correspondentes de conversão, ou seja, definir pontos conhecidos (P-, P0 e P+), que relacionem tensão de entrada com valor da conversão, e, a partir deles, definir a função linear de transferência do conversor, conforme Figura 24.

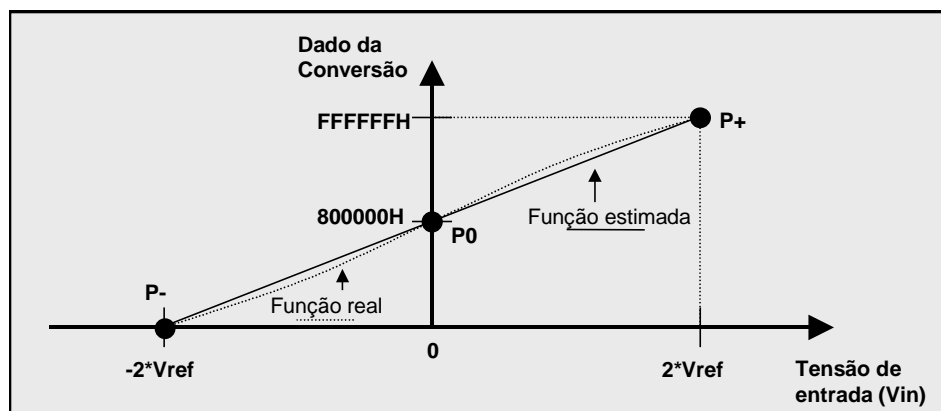


Figura 24 – Não-linearidade da função real: nos pontos de calibração a função real e função ideal de conversão se encontram, porém, afastando-se destes pontos pode existir uma diferença.

O conversor conhece os pontos P_- e P_+ , porque a conversão da tensão de entrada é uma operação relativa à tensão de referência. Como a tensão de referência é dada, o conversor consegue simular internamente as tensões limites de entrada, de $-2 \cdot V_{ref}$ e $+2 \cdot V_{ref}$, e sabe que elas significam $000000H$ e $FFFFFFH$, respectivamente. Além disto, curto-circuitando as entradas V_{in+} e V_{in-} , o conversor garante $0V$ de tensão de entrada, e pode determinar o ponto P_0 , porque sabe que $0V$ corresponde a uma conversão de $800000H$, ou seja, metade do fundo de escala ($FFFFFFH/2$). O procedimento de calibração garante que o erro tenda a zero, acerca dos pontos usados para tal (P_- , P_0 e P_+), mas, à medida que a tensão de entrada se afasta destes pontos, um erro que reflete não-linearidades no processo de conversão aparece.

5.2 Erro total de não-linearidades

A *data sheet* do conversor apresenta uma curva de não-linearidade total que tende a zero nos pontos de calibração e tem seus máximos em tensões intermediárias, conforme Figura 25.

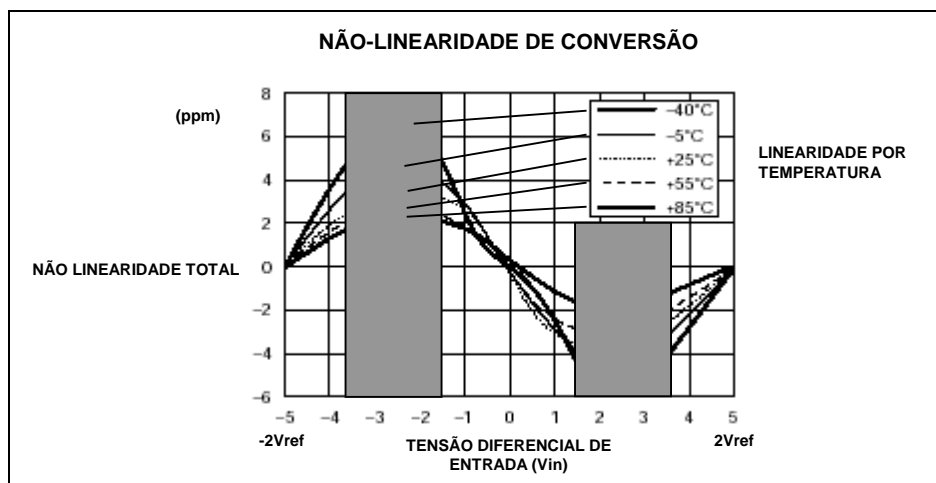


Figura 25 – Curva de não-linearidade do conversor: o erro diminui à medida que se aproxima dos pontos que o conversor usou para fazer a autocalibração ($-2V_{ref}$, 0 e $2V_{ref}$). Para $-1\text{V} < V_{in} < 1\text{V}$, o erro é proporcional a V_{in} , em 2ppm/Vin. Por exemplo, para uma tensão de entrada de 1mV, o erro máximo seria 0,002ppm do fundo de escala de 10V, ou seja, 20nV apenas.

Observando-se a Figura 25, percebe-se que em faixas centrais aos pontos de calibração (faixas sombreadas), o erro total se limita entre 2 a 4ppm (0 a 85°C) do fundo de escala de 10V, ou seja, entre 20 e 40 μV . No entanto, aproximando-se dos pontos de calibração, o erro diminui de maneira aproximadamente linear com a tensão de entrada, com um coeficiente de 2ppm/V na faixa em torno do 0V. Esta característica é muito interessante, pois indica que magnitude absoluta do erro diminui com a magnitude do sinal de entrada. Por exemplo, se o sinal de entrada for de 1mV, o erro será de 0,002ppm do fundo de escala, ou seja, 20nV.

Para o caso das células de carga, cujo fundo de escala é da ordem de 1,65mV, o erro seria de, no máximo, 33nV, muito menor que o ruído próprio do conversor, como será visto adiante.

5.3 Rejeição de modo comum (CMRR – Common Mode Rejection Ratio)

Esta é uma taxa que define quanto o conversor consegue rejeitar um sinal aplicado em comum nas entradas V_{in+} e V_{in-} . Para este conversor, esta atenuação é de 115dB, para sinais contínuos, e 160dB para sinais de 60Hz. Isto significa que pode atenuar cerca de 550mil vezes um sinal comum contínuo, ou

100 milhões de vezes um sinal em 60Hz, comum de interferências da rede elétrica.

Para o caso das células de carga, a tensão de modo comum é de cerca de $2,5V_{cc}$, que implica em um erro de conversão de cerca de $5\mu V$. No entanto, este erro é constante, já que a tensão de modo comum é constante, portanto, ele é eliminado na calibração da célula de carga. Para aplicações com outro transdutor, contudo, este parâmetro deve ser avaliado.

Em relação a um ruído em modo comum de 60Hz, tensões comuns na entrada com valores de até 3,7V de pico produziriam erros menores que a máxima resolução de conversão. Valores de entrada maiores que 5,3V já danificariam o componente.

5.4 Erro de discretização

Este erro é devido a uma incerteza inerente ao processo de digitalização de um sinal. Enquanto um sinal analógico na entrada do conversor pode assumir qualquer valor entre -5 e 5V, por exemplo, o resultado da conversão é representado por uma quantidade limitada de valores discretos, dada pelo número de bits do conversor. A distância mínima entre um valor discreto e outro, define a resolução máxima da medida. Como já foi explicado no capítulo que descreve o hardware do sistema, este conversor tem uma resolução de até 37nV. Assim, variações na tensão de entrada, inferiores a este valor, podem não alterar o valor da conversão. Portanto, uma incerteza de 37nV é inerente a este sistema.

5.5 Rejeição à fonte de alimentação (Power Supply Rejection Ratio)

Esta taxa define quanto o conversor consegue rejeitar oscilações na fonte de alimentação. No caso deste trabalho, as estações foram alimentadas com uma fonte chaveada de $12V_{cc}$ com oscilação máxima de 50mV. Cada estação possui um regulador (LM7805 – Fairchild Semiconductor) que rebaixa esta tensão para

5Vcc e possui uma rejeição de 73 dB, limitando, portanto, a oscilação na alimentação do conversor em $11\mu\text{V}$, teoricamente. Contudo, com o osciloscópio utilizado somente se pode constatar que o ruído de alimentação é menor que 1mV , dada a resolução deste instrumento, o que acarretaria em um ruído de no máximo 560nV na conversão, devido à taxa de rejeição do conversor, de 73dB. Este ruído, contudo, pode ser verificado no teste que se explicará a seguir.

5.6 Erro por influência de ruídos

Apesar do fabricante do A/D informar que a magnitude do ruído de saída do componente é de $1\mu\text{Vrms}$, decidiu-se testar este parâmetro, já que ele pode ser influenciado por fatores que fogem a previsibilidade, como disposição de componentes ou tamanho de trilhas na placa de circuito impresso.

Procurou-se efetuar este teste em uma situação real de aplicação do sistema. Foram coletadas cerca de 300 amostras, em uma frequência de amostragem de 5Hz. Na entrada foi conectada uma das células de carga projetada para este trabalho, com um cabo blindado de 30cm de comprimento. O gráfico da Figura 26 mostra o ruído medido na entrada:

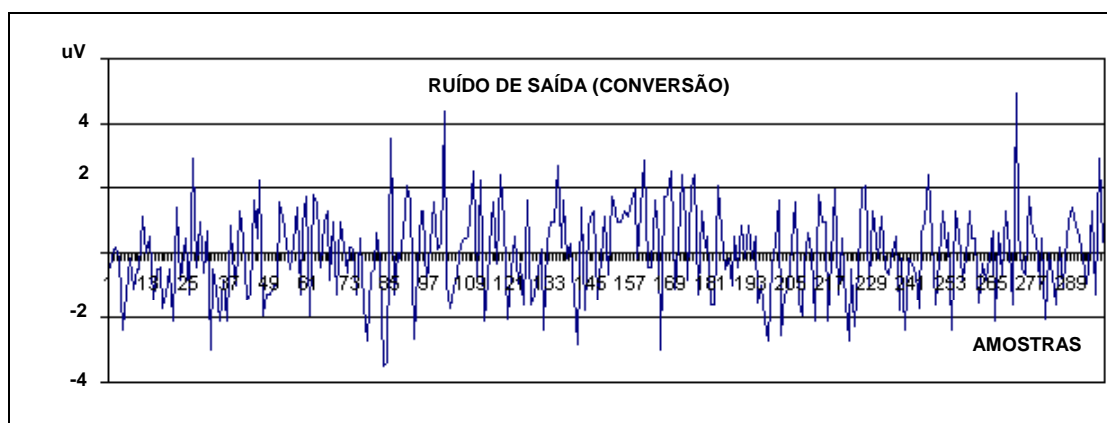


Figura 26 – Ruído na conversão à taxa de 5Hz. O valor eficaz do ruído é de $1,2\mu\text{Vrms}$.

A variância calculada para este ruído foi de $1,4\mu\text{V}$, em torno de uma média de 0V. Por definição, a variância é a soma do quadrado das diferenças entre todas amostras e a média, dividida pelo número de amostras [39]. No caso deste sinal, a variância é, portanto, a média do quadrado das amplitudes. Assim, a raiz

quadrada da variância (o desvio padrão [39]) pode ser interpretada como a raiz média quadrática das amostras, ou seja, o valor RMS (*Root Mean Square*) [40] do ruído, que foi, portanto, $1,2\mu\text{V}$ para uma taxa de amostragem de 5Hz por canal.

5.7 Erro em resumo

A Tabela 2 faz um resumo do erro de conversão que deve ser considerado na aplicação do sistema.

Tabela 2 – Resumo das fontes de imprecisão do sistema.

Tipo de Erro	Valor	Observação
Offset e ganho	$1\mu\text{V}/\text{C}$ Compensados por calibração periódica.	Calibração deve ser mais rápida que mudanças significativas de temperatura.
Não-linearidade total	$2\text{ppm}/\text{Vin}$ ou $\text{Vin}/200.000$	Máximo 4ppm. Ver curva da Figura 25.
Erro por sinal em modo comum	cc: rejeição de 115dB 60hz: rejeição de 160dB	
Incerteza por discretização	37nV	
Ruído de conversão (inclui ruído da fonte)	$1,2\text{Vrms}$	Taxa de amostragem de 5Hz/canal.

6. MÓDULO DE REGISTRO DE PARÂMETROS PONDERAIS

Este sistema foi chamado de *plataforma de hardware e software*, porque serve de base para a criação de módulos para aquisição e registro de diferentes tipos de parâmetros indicativos de atributos do comportamento ingestivo. Estes módulos, chamados Módulos de Registro, devem ser formados, de um lado, pelos transdutores, e do outro, pelo respectivo aplicativo de registro, ambos orientados aos parâmetros que se deseja medir.

Este capítulo descreve os transdutores e o aplicativo de registro que compõem o Módulo de Registro de Parâmetros Ponderais, desenvolvido para medir e registrar, em um arquivo de formato universal, o peso de até 4 tipos diferentes de alimento ou água, por gaiola em experimento.

6.1 Transdutores

Para pesar os comedouros e bebedouros foram desenvolvidas estruturas em alumínio, que se fixam externamente às gaiolas, conforme detalhe da Figura 27.

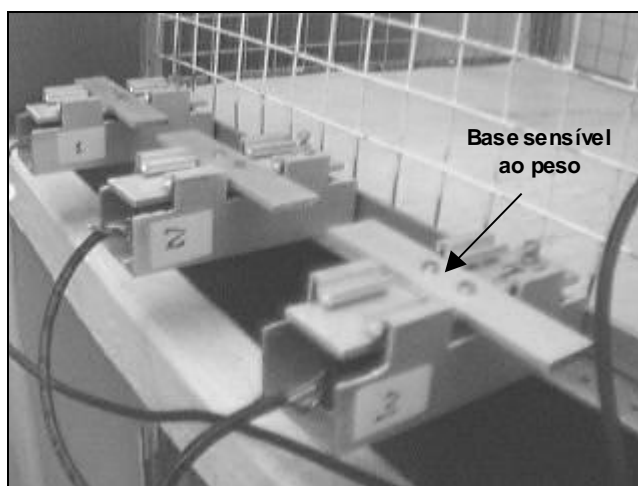


Figura 27 – Foto de três transdutores de peso fixados externamente a gaiola. A base em forma de cruz é a parte sensível ao peso.

Estas estruturas possuem uma base sensível ao peso, em forma de cruz, onde se encaixam os suportes para os comedouros e bebedouros, conforme Figura 28.

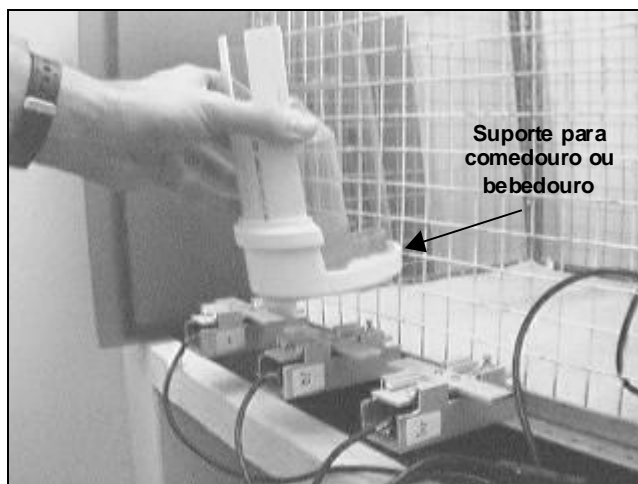


Figura 28 – Foto do suporte para comedouros/bebedouros sendo encaixado no transdutor.

Estes suportes padronizam o encaixe para qualquer tipo de comedor ou bebedor que se utilize, mas seu objetivo principal é formar um anteparo, conforme Figura 29, para reduzir o *spillage* [6], a quantidade de alimento que o animal não consome, mas que poderia cair para fora do comedor durante a refeição, e ser contabilizado como consumido.

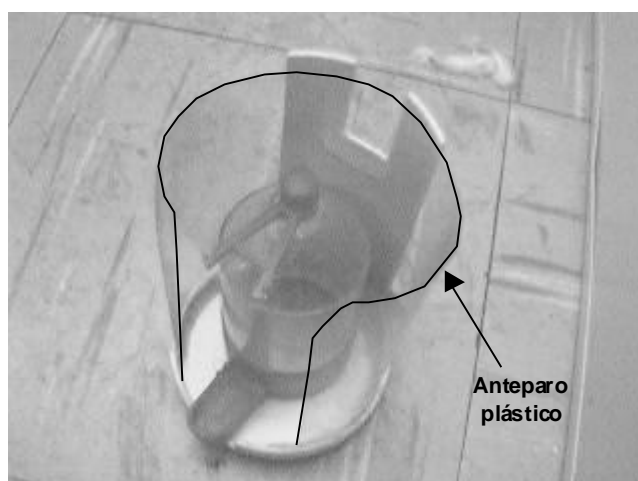


Figura 29 – Foto do suporte com detalhe do anteparo contra *spillage*.

O elemento transdutor por detrás deste aparato é uma célula de carga, conforme Figura 30, presa de um lado à estrutura metálica, e de outro, à base que recebe o suporte dos comedouros.

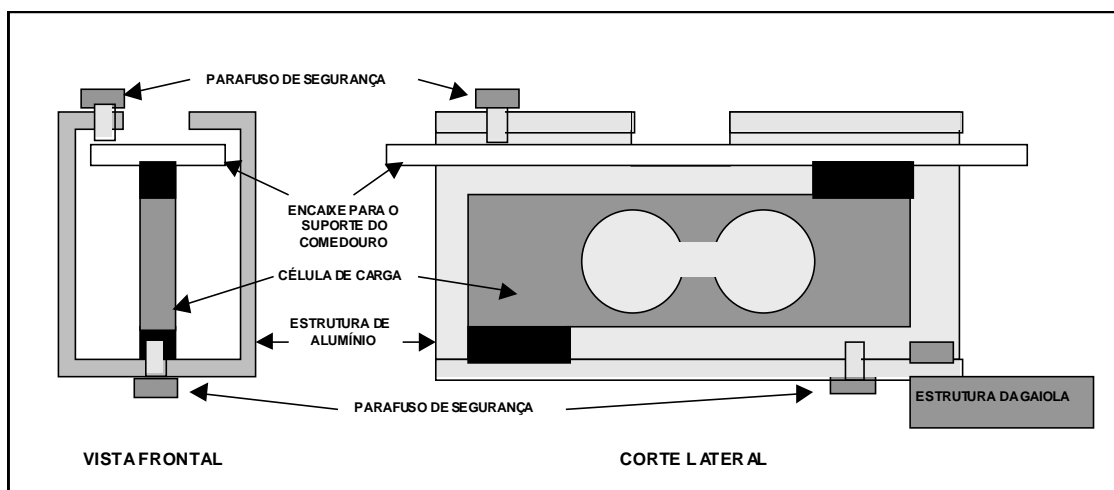


Figura 30 – Detalhes da estrutura do transdutor. A célula de carga (elemento transdutor) é fixada de um lado à estrutura presa na gaiola, e de outro à base livre, onde se encaixam os suportes para comedouros/bebedouros.

6.1.1 Definição da estrutura metálica da célula de carga

A célula de carga é sistema transdutor de força que envolve componentes mecânicos e elétricos. Seu princípio de funcionamento é esquematizado na Figura 31.

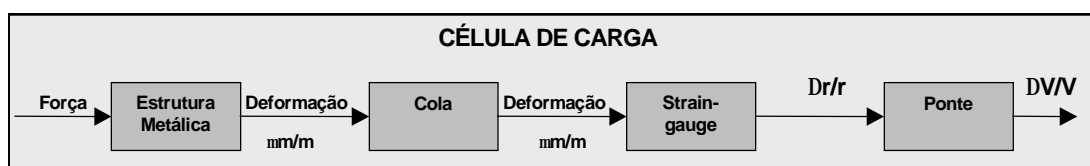


Figura 31 – Processo de transdução na célula de carga: a força é transformada em deformação, transferida ao strain-gauge através da cola, transformada em variação de resistência elétrica que, por fim, a ponte transforma em variação de tensão.

Uma estrutura metálica é submetida à ação da força que se deseja medir. Esta estrutura sofre uma deformação proporcional à força aplicada. Strain-gauges, que são transdutores resistivos de deformação, colados à superfície desta estrutura transformam a deformação mecânica em variação de resistência elétrica. Arranjando os Strain-gauges em ponte, $\frac{1}{2}$ ponte ou $\frac{1}{4}$ ponte, as

variações de resistência elétrica geram um sinal diferencial em tensão, que é portanto proporcional à deformação e consequentemente, à força aplicada na estrutura metálica.

Os metais são preferidos para a construção de células de carga porque apresentam relações bem lineares entre o estresse mecânico σ e a deformação relativa ε , relacionados através do módulo de elasticidade E , que é característico de cada material. Esta relação é descrita pela lei de Hook ($\sigma = \varepsilon \cdot E$) [41] e é válida para deformações na região elástica do material, conforme Figura 32.

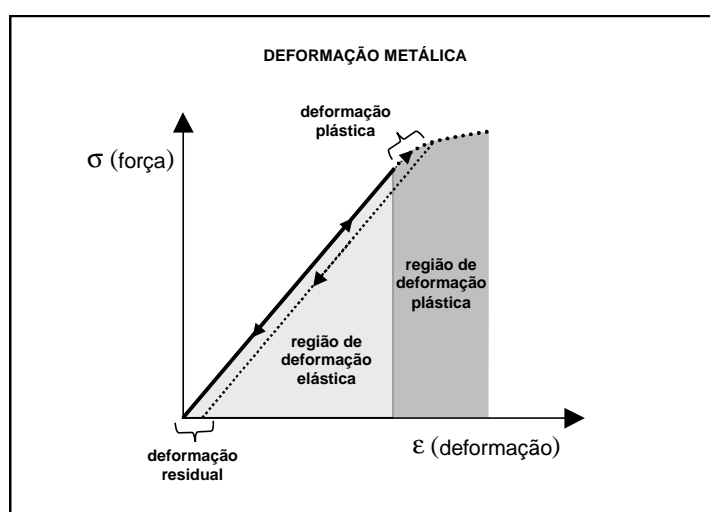


Figura 32 – Deformação metálica típica. Na região elástica de deformação, cessado o estresse (força), o metal volta o tamanho original. Se a deformação, porém, atingir a região plástica, cessado o estresse o metal conservará a deformação (deformação residual) que extrapolou o limite elástico.

Cuidados devem ser tomados no projeto da célula de carga, para que o metal não sofra deformações além da região elástica. Se isso acontecer, o metal se deformará plasticamente, ou seja, conservará uma deformação residual quando a força for retirada, equivalente à deformação que extrapolou o limite elástico, ou seja, mesmo sem peso, a célula de carga continuará informando um determinado valor. Para isso, a célula foi projetada de forma que o peso máximo explore apenas parte da região elástica de deformação, e, mesmo assim, foram acrescentados parafusos de segurança (Figura 30) que limitam a deformação do componente em caso de choques ou peso excessivo.

Um modelo simples de estrutura metálica que poderia ser usada na confecção de uma célula de carga é apresentado na Figura 33.

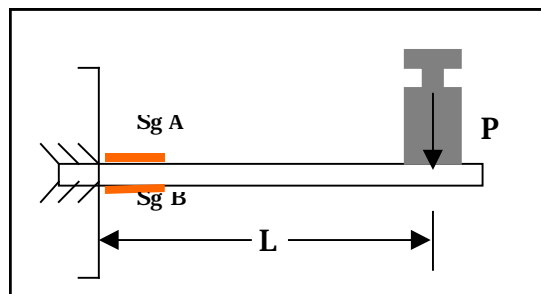


Figura 33 – Modelo simples de célula de carga: uma barra é engastada em uma extremidade. Na outra se aplica uma força que causará flexão na barra, e, deformação na região onde estão colados os strain-gauges.

Neste modelo, uma barra de aço é engastada em uma de suas extremidades. Junto ao engaste são colados os strain-gauges Sg A e Sg B, para medir a deformação causada na barra pelo peso P. Na região onde estão colados os strain-gauges, o peso P provoca dois tipos de força: força cortante de módulo P e momento fletor de módulo $P \times L$. A força cortante não causa deformação nas superfícies superior e inferior da barra, e sim nas laterais, não alterando, portanto, a resistência dos strain-gauges. Já o momento fletor causa uma tração na superfície superior, aumentando a resistência de Sg A, e uma compressão na superfície inferior, diminuindo a resistência de Sg B. Se estes strain-gauges estiverem ligados em $\frac{1}{2}$ ponte, conforme Figura 34, a tensão diferencial $V_{1,2}$ aumentará proporcionalmente ao momento fletor.

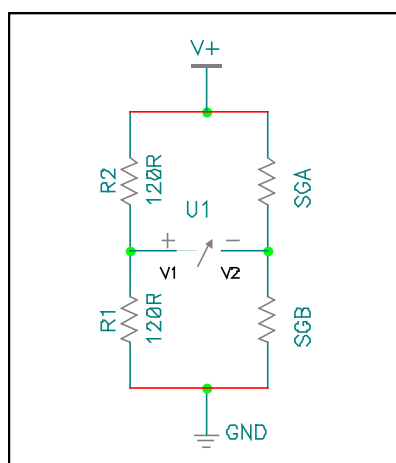


Figura 34 - Strain-gauges, SGA e SGB em $\frac{1}{2}$ ponte.

Percebe-se, portanto, que esta célula de carga somente seria um bom transdutor de peso se o peso fosse aplicado sempre no mesmo ponto, pois o sinal de saída $V_{1,2}$ não é proporcional ao peso, e sim ao momento fletor. Em outras palavras, um mesmo peso causaria diferentes leituras se colocado em pontos ligeiramente diferentes ao longo da barra de aço. Por exemplo, no caso deste trabalho, onde as células de carga pesam comida de pombos, uma diferente distribuição da mesma quantidade de comida, causaria um deslocamento do centro de gravidade nos comedouros, alterando o momento fletor e conseqüentemente a leitura do peso. A Figura 35 ilustra este efeito.

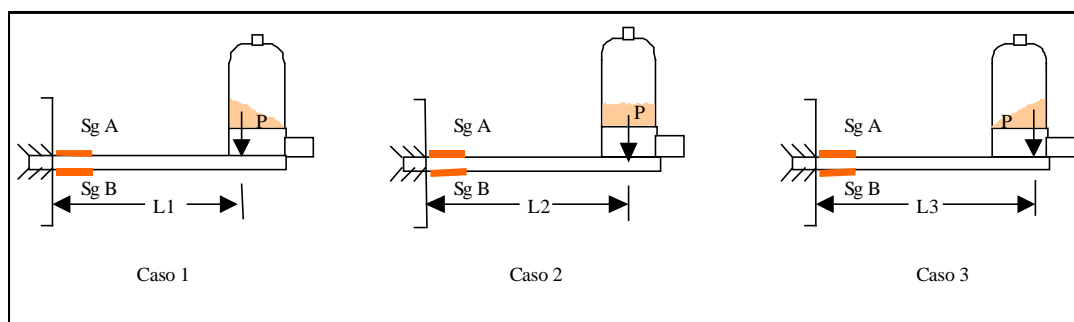


Figura 35 - A medida desta célula varia com o momento ($P \times L$), que pode mudar de acordo com a distribuição de comida dentro do comedouro.

Voltando ao diagrama da Figura 31, conclui-se que não basta ao transdutor ser sensível a forças de maneira genérica, pois a deformação onde está colado o strain-gauge pode ser causada por componentes como momento fletor, cortante e momento torçor, que não são dependentes apenas do peso. A estrutura metálica do transdutor deve, portanto, permitir que se isole a contribuição da componente peso no sinal de saída.

O modelo a seguir, da Figura 36, é um pouco mais complexo e explica bem o princípio de funcionamento das células de carga normalmente utilizadas para medição de peso. Neste modelo, duas barras são engastadas paralelamente, nas duas pontas, em blocos maciços. Um dos blocos é fixado e outro fica livre sob a ação do peso colocado no prato.

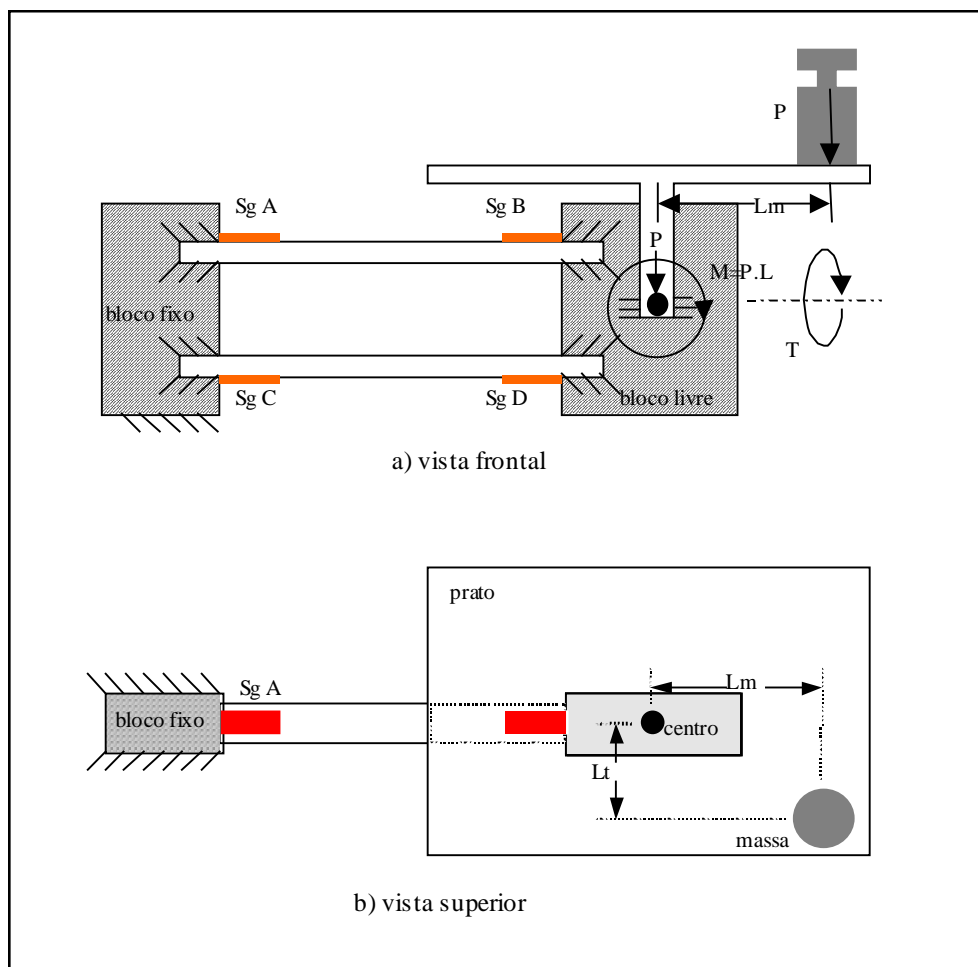


Figura 36 – Modelo de célula de carga seletiva a peso.

A força aplicada no ponto central do bloco livre pode ser decomposta em três componentes:

- **Peso (P)**, equivalente ao peso do prato mais a massa colocada;
- **Momento (M)**, equivalente ao peso da massa vezes o braço de alavanca L_m , medido longitudinalmente às barras, do centro do prato até o ponto onde a massa foi colocada, e
- **Torção (T)**, equivalente ao peso da massa vezes o braço de alavanca L_t , medido transversalmente às barras, do centro do prato até o ponto onde a massa foi colocada.

A metodologia para definição do comportamento desta célula compreenderá a descrição de como cada uma das componentes, peso (P),

momento (M) e torção [T], influenciam na deformação da superfície da barra onde os strain-gauges estão colados.

A Figura 37 apresenta, de maneira exagerada, o efeito aumentado do peso na estrutura metálica da célula, para que se visualize com facilidade os pontos de deformação.

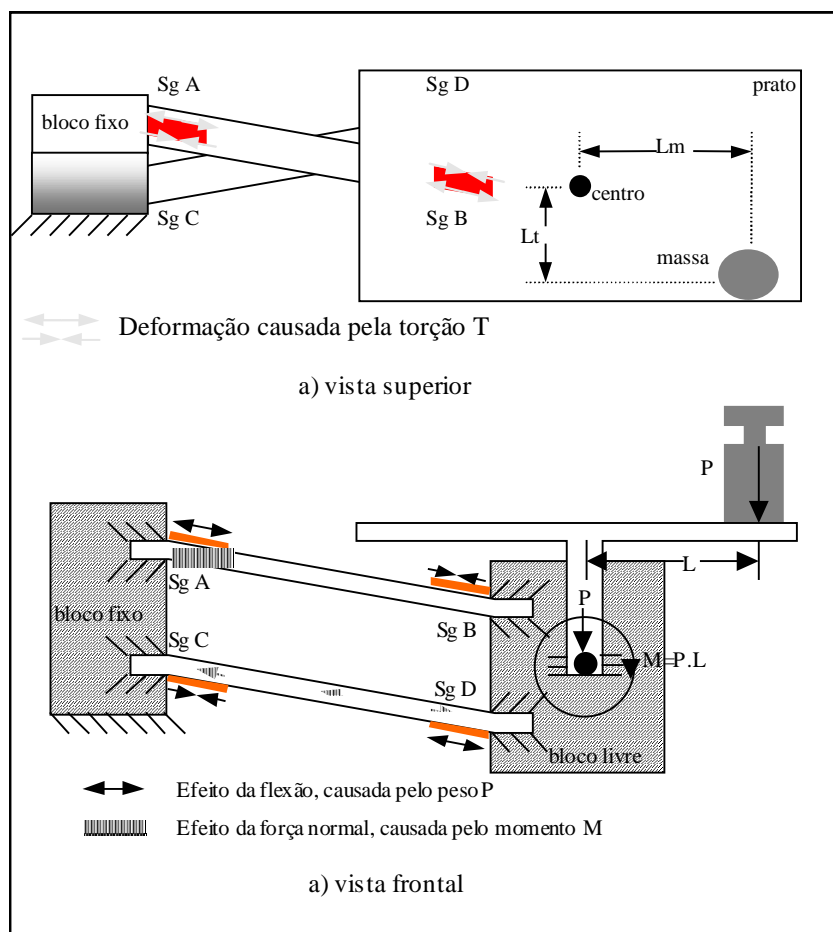


Figura 37 - Modelo sofrendo deformação.

Se a massa for colocada a uma distância L_t (Figura 37) do centro do prato, o peso P causará uma torção nas barras. Contudo, o efeito da torção na superfície da barra, gera tração em uma metade do strain-gauge e compressão na outra, ou seja, uma deformação média nula. Assim, a torção, ou o deslocamento L_t da massa no prato, não influencia na medida do peso.

Já a componente de peso P desloca o bloco livre para baixo e gera um momento fletor nas barras análogo ao exemplo da Figura 33, que neste caso traciona os strain-gauges A e D e comprime os B e C, conforme indicam as setas

pretas logo acima dos strain-gauges, na Figura 37. Enquanto isso, o momento M causa forças normais de tração ou compressão nas barras, dependendo do lado do prato onde é colocada a massa. No exemplo da Figura 37, com a massa colocada a direita do centro do prato, o momento causa uma tração normal da barra superior e uma compressão normal da barra inferior, conforme indicam as setas hachuradas. Como a força normal se distribui homogeneamente na barra, tanto no interior do material quanto na superfície, onde estão colados os transdutores, o efeito do momento M sobre os strain-gauges é: traciona A e B e comprime C e D, conforme indicam as setas hachuradas.

Em resumo, neste modelo de estrutura metálica ocorre o seguinte:

- a torção T não gera sinal, ou seja, não influencia na medida de peso;
- peso P gera sinal em função de deformações causadas apenas pela flexão nas barras, e
- momento M gera sinal em função de deformações causadas apenas por força normal nas barras.

Se fosse possível, portanto, evidenciar o sinal gerado pela deformação causada pela flexão (referente ao peso) e anular o sinal gerado pela deformação causada pela força normal (referente ao momento), esta célula seria sensível ao peso somente, independentemente do local no prato onde fosse colocada a massa. Isso é feito de duas maneiras, uma elétrica e outra mecânica.

A maneira elétrica para anular o efeito da força normal nas barras se explica através do funcionamento da ponte da Figura 38.

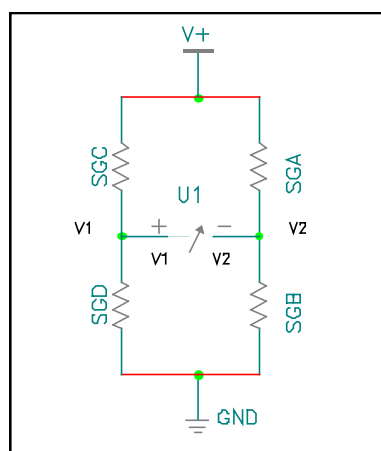


Figura 38- Ponte completa de strain-gauges.

Através da Figura 37 percebe-se que a força normal causada pelo momento gera uma deformação de mesmo sentido ao longo de cada uma das barras, enquanto que a flexão causada pelo peso gera deformações em sentidos opostos nas extremidades da mesma barra. Se forem ligados em série os dois strain-gauges da mesma barra, conforme Figura 38, o efeito da força normal não será medido, pois fará com que as resistências SGA e SGB aumentem, o que não muda a tensão V_2 , e com que SGC e SGD diminuam, o que também não muda o valor de V_1 . Por outro lado, o efeito das flexões aumenta o valor de SGA e diminui o valor de SGB, fazendo com que V_2 diminua, enquanto que na barra inferior diminui o valor de SGC e aumenta o valor de SGD, fazendo com que V_1 aumente, gerando uma tensão diferencial $V_{1,2}$ que é proporcional somente à flexão que por sua vez é proporcional somente ao peso. Em resumo, basta dizer que o efeito do momento se anula e o efeito do peso se evidencia na ponte.

A maneira mecânica de diminuir o efeito do momento nas medidas baseia-se em dimensionar a estrutura de forma que a flexão gere uma deformação na superfície, onde está colado o strain-gauge, muito maior do que a deformação causada por uma força normal de mesma ordem. Isto se consegue com a barra em forma de lâmina, ou seja, bem mais larga do que espessa, conforme Figura 39.

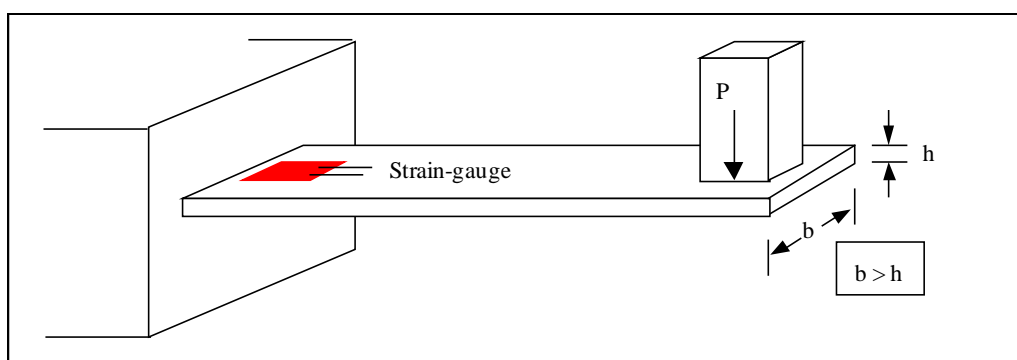


Figura 39 – Condições para diminuir o efeito da força normal no strain-gauge: estrutura laminar, ou seja, $b \gg h$.

6.1.2 A Célula de Carga Construída

A célula de carga que realmente foi construída é apresentada na Figura 40. Este é o tipo mais comum de célula de carga para balanças existente no mercado. A estrutura desta célula segue exatamente o mesmo princípio descrito

para o modelo anterior (Figura 36), porém, agrega algumas características que aumentam o ganho e a linearidade, além de ter um desenho mais fácil de fabricar (usinar).

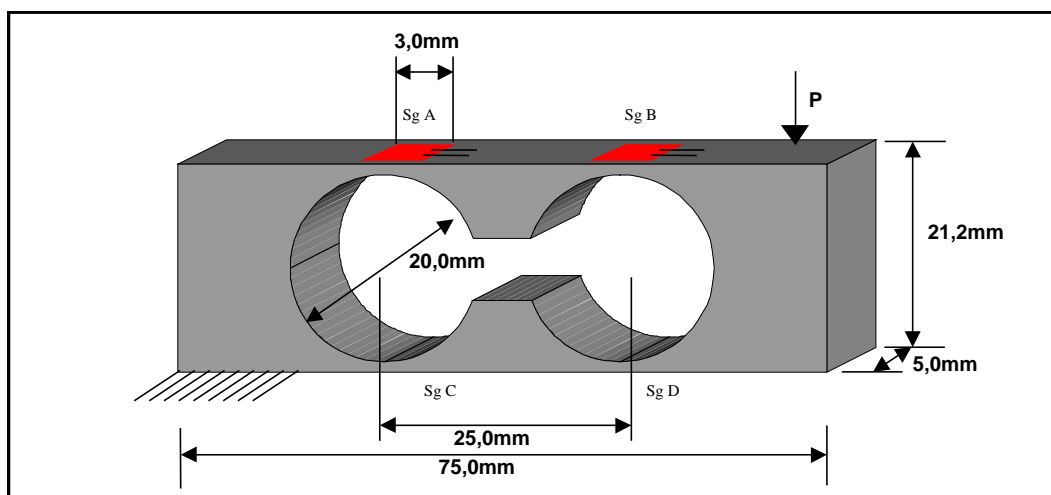


Figura 40 - Célula de carga construída.

A célula foi construída em aço nas dimensões apresentadas na Figura 40. A liga exata do aço usado é desconhecida, contudo a força máxima que a célula suportou, sem entrar na região de deformação plástica (Figura 32), foi medida em cerca de 750g. Foram utilizados strain-gauges de 3mm (0,120in) e 120ohms, modelo EA-06-060LZ-120 (Measurements Group, INC, Raleigh, North Carolina, USA). Para colar os strain-gauges na estrutura metálica foi usado adesivo epoxi modelo KBR610 (Kratos Equipamentos Industriais LTDA, Cotia, SP). Para secar a cola, a célula foi levada a um forno à 160°C por cerca de 2 horas e 30 minutos. Os strain-gauges utilizados não necessitam de proteção após a colagem, de acordo com seu fabricante.

A Figura 41 apresenta em duas dimensões a mesma célula, com o efeito aumentado do peso na estrutura, para que se visualize com facilidade os pontos de deformação.

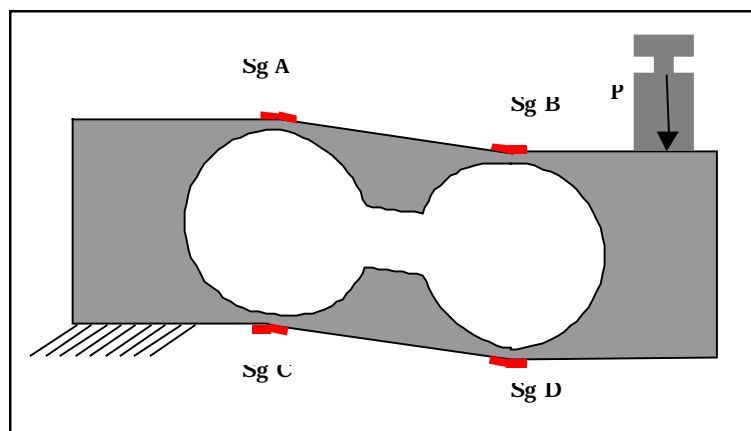


Figura 41 – Célula construída (em 2D) sofrendo deformação.

O maior ganho deste modelo se deve ao fato de que a flexão se concentra na região de estreitamento do material, onde está colado o strain-gauge, ao contrário do modelo anterior, onde a flexão se distribuía ao longo de toda a barra. Este estreitamento progressivo do material também confere maior linearidade na relação entre tensão e deformação. O strain-gauge mede, na verdade, a deformação média na região onde está colado. Por isso deve-se cuidar para que as linhas de força no material, que representam a tensão, estejam uniformemente distribuídas nesta região e assim se mantenham dentro determinados limites de tensões. O modelo antiquado da Figura 36 é formado por um bloco metálico praticamente indeformável que estreita abruptamente para a espessura da barra na região onde ela está engastada. De maneira geral, cantos retos como este, fruto do engaste da barra, concentram tensões elevadas e distorcem a distribuição das linhas de força no material, o que gera sensíveis não-linearidades entre tensão e deformação.

6.2 Aplicativo de Registro

A função do aplicativo de registro no sistema de medição é informar o valor das medições e registrá-las para análise posterior. Assim, ele é um software desenvolvido para ser a interface do SIRCI com o usuário final. Porém, o aplicativo deve ser orientado ao experimento e não ao sistema de medição. Por

isso, optou-se pelo desenvolvimento do SIRCI como um sistema que servisse de plataforma para a criação de aplicativos de registro, um para cada tipo de parâmetro de comportamento que se deseje investigar.

Um aplicativo particularizado é mais fácil de operar porque pode conduzir o usuário a tomar somente as decisões pertinentes ao registro daquele tipo de parâmetro, enquanto que um aplicativo genérico poderia necessitar de tantas configurações, a ponto de tornar-se complicado ao usuário. O aplicativo aqui descrito, por exemplo, se destina somente a informar e registrar o peso de até quatro comedouros/bebedouros por gaiola em experimento. Mesmo assim, o processo de registro necessita uma série de informações como:

- a porta serial em que foi conectado o barramento;
- a taxa de aquisição dos canais (células de carga);
- as estações (gaiolas) que participarão do registro;
- destas estações, os canais que devem ser registrados;
- e finalmente, o nome do arquivo para registro.

Para tornar o aplicativo fácil de operar automatizou-se algumas destas tarefas, considerando que o usuário passa algumas informações de maneira implícita ao sistema. Por exemplo, se o usuário conecta uma estação, significa que ele quer registrar dados desta estação, e se ele conecta uma célula de carga a esta estação significa que ele deseja registrar este canal.

A seleção da porta serial do computador, onde foi conectado o barramento poderia ser feita automaticamente também, através de um algoritmo específico, porém isso ainda não foi implementado no trabalho, e a seleção da porta deve ser manual. Já a seleção da taxa de aquisição é uma decisão do usuário. Se ele deseja, por exemplo, observar apenas a distribuição do consumo de alimentos ao longo do dia, uma amostra a cada minuto basta, e ele terá uma tabela com menos dados para analisar, do que se tivesse usado a aquisição máxima de 5 amostras por segundo (300 por minuto). Por outro lado, se ele deseja observar quanto o animal consome em uma bicada, então terá que selecionar a taxa máxima, mas provavelmente não será preciso fazer um registro tão longo.

Ao abrir o aplicativo, portanto, na janela principal o usuário deve informar qual é a porta serial em que o barramento está conectado e qual é a taxa desejada de aquisição. Quando ele clicar no botão que conecta o aplicativo com a rede, as estações conectadas ao barramento são reconhecidas automaticamente (existe um temporizador que verifica periodicamente quais estações estão conectadas). Como todas as estações são semelhantes entre si e exigem funções semelhantes, criou-se uma classe para controlá-las. Cada vez que uma nova estação é encontrada na rede, o aplicativo sinaliza ao usuário que encontrou uma estação na posição n (seqüência no barramento), pede que seja dado um nome a esta estação e abre uma janela de interface (objeto da classe estação) para controlá-la. Em um experimento que tenha duas estações conectadas, por exemplo, além da janela principal existiriam outras duas janelas, uma para cada estação. A Figura 42 mostra a tela do programa neste caso, quando a segunda estação foi encontrada.

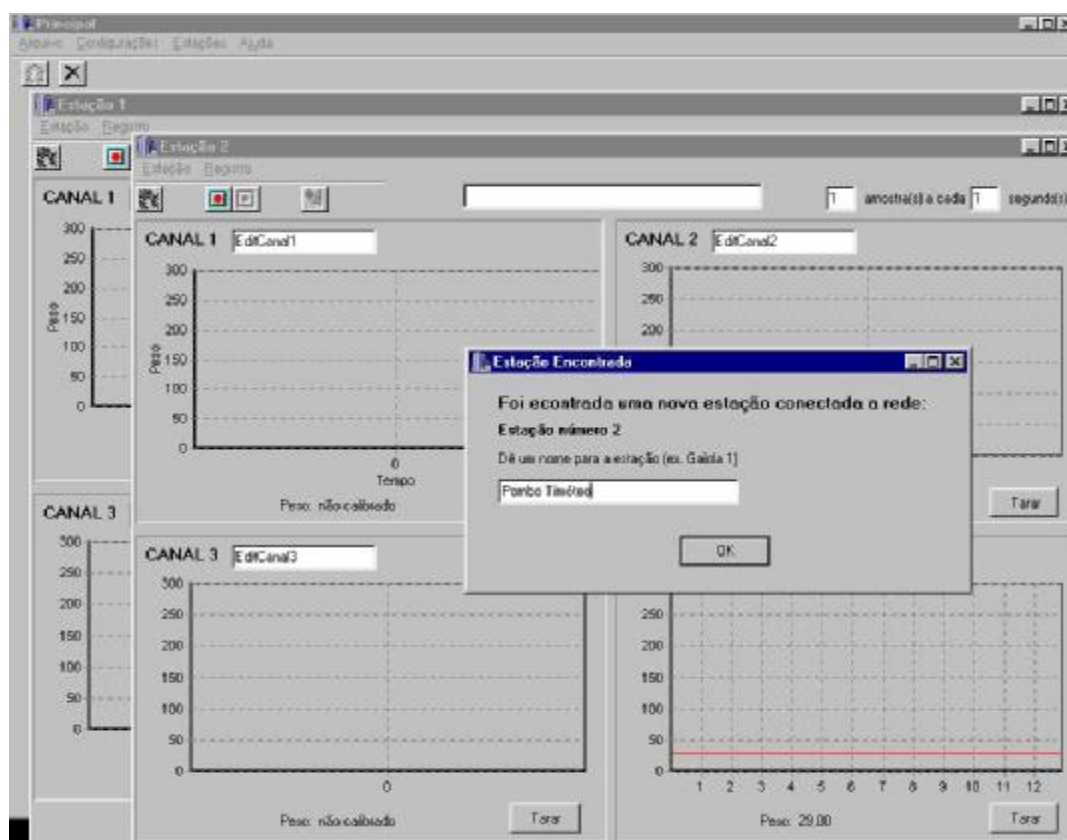


Figura 42 – Tela do aplicativo. Quando uma estação é encontrada, o aplicativo pede um nome para a estação e abre uma interface gráfica para controlá-la.

Como pode ser visto na Figura 42, a interface para cada estação possui 4 telas pequenas, onde se pode observar o peso, no tempo, para cada um dos canais (células de carga). Contudo, antes que a interface possa informar o valor que está sendo medido, é necessário efetuar um processo de calibração das células de carga conectadas. Um clique no botão de calibração, na barra de ferramentas, inicia este processo.

Em uma primeira etapa, o aplicativo procura os transdutores conectados na estação, conforme a tela da Figura 43.

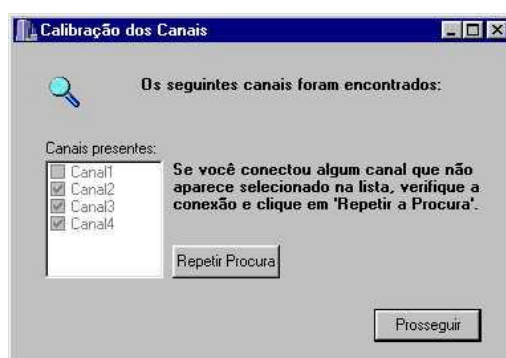


Figura 43 – Aplicativo procurando as células de carga conectadas na estação.

Os canais que têm uma célula de carga conectada, aparecem marcados. Se o usuário esqueceu de conectar alguma célula de carga, ele a conecta e clica no botão “Repetir Procura”. Senão ele clica em “Prosseguir” e se abrirá sucessivamente a mesma tela de calibração para cada um dos canais que foram conectados, conforme a Figura 44.



Figura 44 – Tela de calibração: o aplicativo orienta o usuário o sistema para a célula de carga.

O processo de calibração supõe que o sinal da célula de carga varia linearmente com o peso. Assim, é preciso determinar os coeficientes da função (linear) que transforma os valores lidos do conversor A/D (eixo x), para valores em gramas (eixo y), conforme a Figura 45.

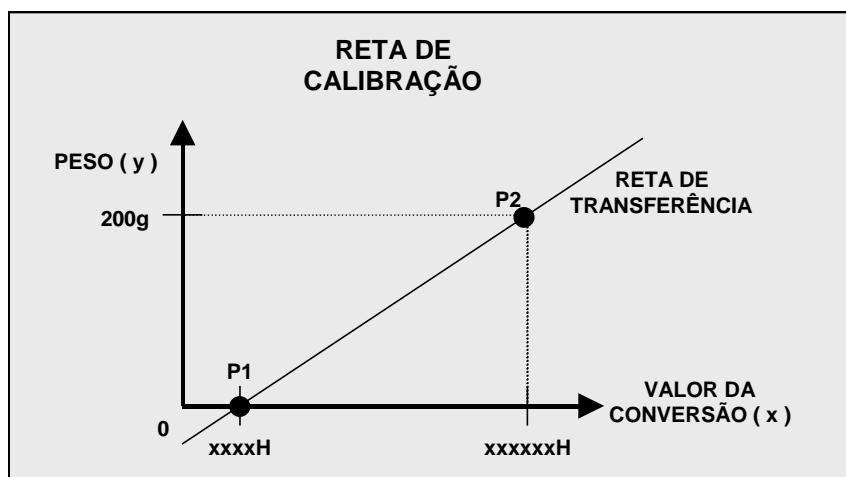


Figura 45 – Reta de calibração: define a função de transferência entre o valor da conversão do A/D e o valor de peso informado pelo sistema. O usuário fornece dois pontos conhecidos para que o sistema determine a função (reta): um sem peso sobre o transdutor (P1), e outro com um peso conhecido (P2).

Para isso, a tela de calibração instrui o usuário a gerar dois pontos conhecidos cerca dos extremos desta reta. Primeiro, solicita ao usuário que retire todo o peso do transdutor. Neste momento o aplicativo gera o primeiro ponto

(P1), onde o peso, y , é igual a zero e x é o valor da conversão. Depois o aplicativo gera o segundo ponto (P2), pedindo que o usuário coloque um peso conhecido, perto do fundo de escala, e informe seu valor. Neste caso y será o valor informado, e x , o valor da conversão.

Se por algum motivo o usuário não desejar calibrar o canal, ele clica em “Cancela” (Figura 44), e a mesma tela se abrirá para o canal seguinte, até o último canal conectado na estação. Quando o último canal for calibrado, o programa volta a tela da estação com o nome dado aos canais ou o estado (não conectado ou não calibrado) de acordo com o processo de calibração, conforme a Figura 46.

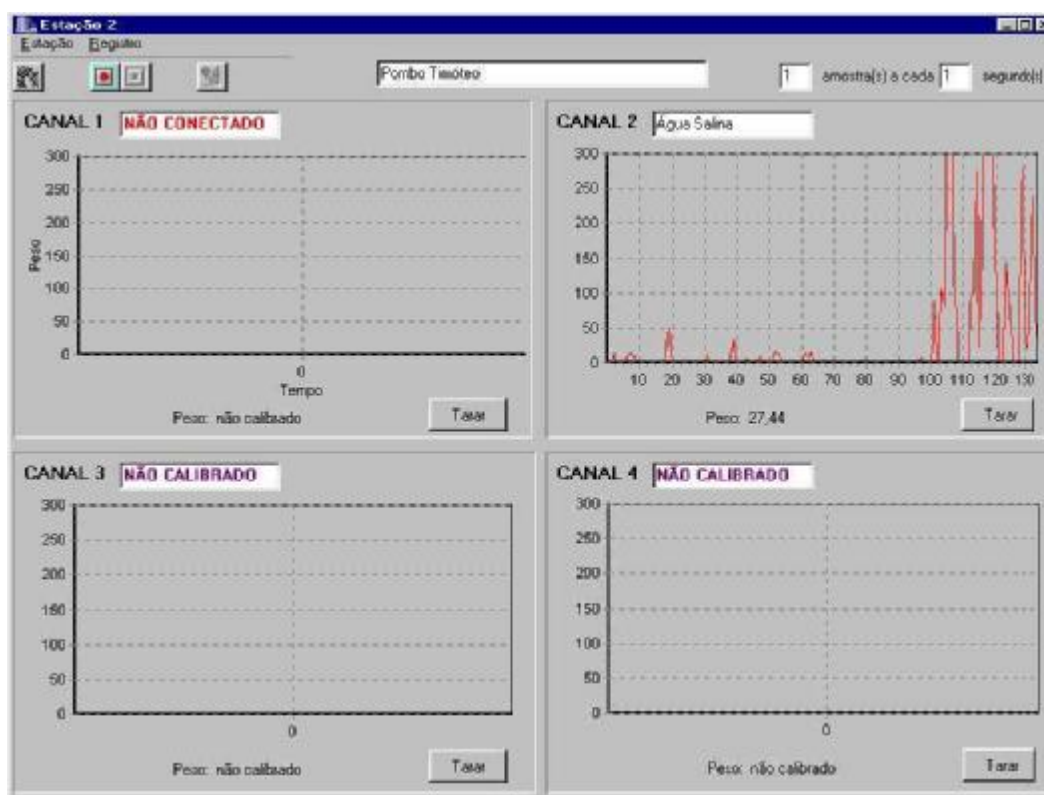


Figura 46 – Detalhe do *status* dos canais. Após o processo de calibração, o aplicativo atualiza o nome dos canais, com o nome dado ou com o estado do canal.

Os canais não conectados ou não calibrados não têm seus valores mostrados nos gráficos. Os canais calibrados são mostrados na tela gráfica e podem ser tarados com o peso do comedor para que a medida conte apenas o peso da comida, por exemplo. Depois do processo de calibração, o programa permite que se inicie o registro dos canais. Para isso o usuário deve clicar no

botão de gravação. Será pedido um nome para o arquivo que guardará os dados, e o registro é iniciado.

Durante o período de registro, o usuário pode desejar fazer alguma anotação, como, por exemplo, sinalizar que em determinado momento houve um ruído elevado no laboratório, ou mesmo anotações complementares sobre o comportamento do animal. Para isso ele deve clicar no botão de comentários. Uma janela se abrirá e ele poderá selecionar uma observação pré-estipulada ou fazer seu próprio apontamento, conforme Figura 47.



Figura 47 – Tela para inserção de comentários. O usuário pode selecionar um comentário pré-determinado ou digitar sua própria observação. Este apontamento é anexado no arquivo de registro.

Ao clicar no botão “OK” do formulário de comentário (Figura 47), o apontamento é anexado ao arquivo de registro, na última coluna, como pode ser visto na Figura 48.

O formato de arquivo criado pelo aplicativo é o *.csv* (*coma separated values*), reconhecido por planilhas comerciais. Neste formato (Figura 48), linhas de texto são interpretadas como linhas de uma tabela, e vírgulas são interpretadas como separador de colunas. Durante o tempo de registro, este arquivo é atualizado automaticamente a cada 30 segundos, para não perder os dados em caso de falta de energia ou outro tipo de pane. Neste arquivo, além dos dados relativos ao peso da comida no tempo, e dos comentários do investigador, são gravadas também informações relativas a: taxa usada na aquisição, a tara de cada canal, o momento do início do registro, os nomes dados aos canais e a estação e os coeficientes de calibração dos canais.

7. TESTES

Devido à natureza ampla deste trabalho, na metodologia para seu desenvolvimento dividiu-se as tarefas a serem desenvolvidas em diversas etapas, como escolha de componentes, projeto de hardware, montagem de placas, desenvolvimento de softwares, construção de células de carga e etc. Algumas destas podiam ser desenvolvidas paralelamente, outras, contudo, dependiam do sucesso de uma etapa anterior. Então, cada etapa que era pré-requisito para uma seguinte, quando terminada, era testada.

Assim, os testes sempre fizeram parte da metodologia do trabalho, desde sua criação até o atual estado de desenvolvimento. Neste capítulo, porém, serão apresentados os resultados dos testes com o Módulo de Registro de Parâmetros Ponderais. O enfoque destes testes estava em avaliar a qualidade das células de carga como transdutores para a necessidade do trabalho, no que se refere a suas características técnicas como linearidade, sensibilidade e outras que serão vistas a seguir. Durante estes testes todos os sub-sistemas do SIRCI estavam envolvidos, portanto, procurou-se estar atento a possíveis falhas de comunicação, erros em dados, funcionamento de programa, interface e etc., para, ao contrário dos testes parciais, testar o sistema como um todo.

Estes testes foram divididos em dois grupos: testes para avaliação das células de carga e testes com animais. Um transdutor de temperatura foi acrescentado no quarto canal da estação número 2, para obter o registro simultâneo da temperatura ambiente.

7.1 Testes para Avaliação das Célula de Carga

Com medições rápidas, ou seja, efetuando a leitura logo após a colocação do peso sobre as células, foram avaliados os seguintes aspectos destes transdutores:

- sensibilidade;
- desbalanço de zero;

- linearidade;
- histerese;
- erro por excentricidade;

O desbalanço de zero e a sensibilidade foram medidos pelos coeficientes da curva de calibração feita pelo aplicativo, conforme foi explicado no capítulo 5, Figura 45, considerando a tensão de excitação da ponte de 5V. Assim, a medida de desbalanço é dada em μV , e a medida de sensibilidade é dada em μV por grama de massa, por Volt de excitação, ou seja, $\mu\text{V/Vg}$. Estes dados para cada uma das células são apresentados na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Sensibilidade e desbalanço das células de carga.

	Sensibilidade		Desbalanço de zero (μV)
	$\mu\text{V/Vg}$	5V excitação ($\mu\text{V/g}$)	
Célula 1	3,1	15,5	752
Célula 2	2,8	14,0	810
Célula 3	2,8	14,0	832
Célula 4	3,4	17,0	715
Célula 5	2,6	13,0	946
Célula 6	2,8	14,0	829

A Tabela 4, a seguir, particulariza a imprecisão do sistema com o uso destas células de carga.

Tabela 4 – Imprecisão do sistema na aplicação com as células de carga: o ruído de conversão é o único item relevante.

Tipo de Imprecisão	Valor	Observação	Nesta Aplicação
Erro de offset e ganho	$1\mu\text{V/C}$ Compensados por calibração periódica.	Calibração deve ser mais rápida que mudanças significativas de temperatura.	Compensado a cada 20s.
Não-linearidade total	2ppm/Vin ou Vin/200.000	Máximo 4ppm. Ver curva da Figura 25.	Menor que 10nV para o fundo de escala do transdutor.
Erro por sinal em modo comum	cc: rejeição de 115dB 60hz: rejeição de 160dB		cc: compensado pela calibração do aplicativo. 60Hz: Não mensurável.
Incerteza por discretização	37nV		37nV
Ruído de conversão (inclui ruído da fonte)	1,2Vrms	Taxa de amostragem de 5Hz/canal.	1,2Vrms

Como pode ser observado na última coluna da Tabela 4, a única imprecisão relevante deve-se ao ruído de conversão, já que as outras são compensáveis ou menores que a própria incerteza da discretização. Este ruído causa uma limitação na medição com as células de carga. Como seu valor eficaz é de $1,2\mu\text{V}$, seu valor de pico-a-pico pode ser até 6,6 vezes mais alto [26], ou seja, a medida pode variar em uma faixa de $7,9\mu\text{V}$. Dada a sensibilidade média das células em torno de $15\mu\text{V/g}$, este ruído causaria uma variação na medida de peso em torno de 0,5g. Esta variação limita a resolução das células para a medição de peso. Para melhorá-la, é possível fazer a média de algumas amostras antes de apresentar a medida. Na verdade, o aplicativo de registro de peso utiliza este recurso, porque nem sempre é desejado ter 5 amostras por segundo (frequência de conversão das estações). Assim, quando o usuário diminui a taxa de aquisição para 1 medição a cada 5 segundos, por exemplo, o aplicativo faz a média de 25 amostras para cada medida apresentada. Isto permite que o ruído seja diminuído por um fator de 5, equivalente à raiz quadrada do número de amostras usadas na média [26]. Desta maneira, a variação na medida cairia para cerca de 0,1g. A Tabela 5 relaciona a variação máxima na medida, teórica, para diferentes taxas de medida.

Tabela 5 – Precisão nas medidas para diferentes taxas.

	Sensibilidade ($\mu\text{V/g}$)	Variação na Medida		
		5 amostras/seg	1 amostra/seg	1 amostra/ 5seg
Ruído conversão do sistema μVpp		$7,9\mu\text{V}$	$3,5\mu\text{V}$	$1,6\mu\text{V}$
Célula 1	15,5	0,51g	0,23g	0,10g
Célula 2	14,0	0,56g	0,25g	0,11g
Célula 3	14,0	0,56g	0,25g	0,11g
Célula 4	17,0	0,46g	0,21g	0,09g
Célula 5	13,0	0,61g	0,27g	0,12g
Célula 6	14,0	0,56g	0,25g	0,11g

O erro por excentricidade é uma medida de quanto varia o valor de peso informado, se a massa for colocada afastada do centro do suporte da balança. Foram feitos dois testes, um para um deslocamento transversal à célula de carga, e outro para deslocamento longitudinal. Para ambos, foi usada a massa de 100g colocada respectivamente a 3,6cm (transversalmente) e 4,7cm (longitudinalmente) do centro. Portanto, este erro será dado como uma variação

do peso informado, dividido pelo peso real, por centímetro de afastamento do centro, ou seja, em porcentagem de peso por centímetro (%P/cm), conforme Tabela 6. Os campos sinalizados com “-”, informam que o erro para a máxima massa, ou massa nominal (150g), colocada na extremidade do suporte da balança, não gera uma diferença mensurável pelo sistema.

Tabela 6 – Erro de excentricidade.

	Erro Transversal (% de carga / cm)	Erro Longitudinal (% de carga / cm)
Célula 1	0,11	0,25
Célula 2	0,056	0,056
Célula 3	0,44	-
Célula 4	0,33	0,083
Célula 5	0,083	-
Célula 6	0,083	0,056

Para realizar os testes de linearidade e histerese cada uma das células foi calibrada, conforme processo já explicado, em dois pontos: zero e 100g. Depois disto, foram testados 22 pontos entre 0 e 150g, aumentando-se sucessivamente a massa, e quatro pontos diminuindo a massa até zero. As massas usadas nos testes eram exatas até duas casas depois da vírgula (em gramas) apresentando erros de no máximo 4mg em relação à massa informada (testado em balança analítica com divisão de 100 μ g). A medida de cada ponto do teste foi resultado da média de 50 amostras, a uma taxa de amostragem de 5Hz. Foi considerada apenas uma casa decimal da medida, pois as demais não eram estáveis.

A Tabela 7 a seguir mostra o resultado dos testes. Por motivos de formatação deste texto, ela foi dividida em três partes: 1) faixa de 0 a 10g; 2) faixa de 10 a 150g e 3) retirada das massas, para verificar a histerese.

Tabela 7. a – Teste de linearidade (faixa de 0 –10g): colocação das massas.

	MASSAS (COLOCAÇÃO) em gramas							
	0,00	0,50	1,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00
Célula 1	0,0	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Célula 2	0,0	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Célula 3	0,0	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Célula 4	0,0	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Célula 5	0,0	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Célula 6	0,0	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0

Tabela 7 . b - Teste de linearidade (faixa de 10 –150g): colocação das massas.

	MASSAS (COLOCAÇÃO) em gramas														
	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	110,00	120,00	130,00	140,00	150,00
Célula 1	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0	120,0	130,0	140,0	149,9
Célula 2	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,1	70,1	80,1	90,1	100,1	110,0	120,3	130,1	140,2	142,3
Célula 3	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,1	79,8	89,8	99,9	110,0	119,9	130,1	140,1	150,0
Célula 4	10,0	20,0	30,1	40,1	50,1	60,1	70,1	80,1	90,1	100,2	110,2	120,2	130,1	139,2	143,3
Célula 5	10,0	20,0	30,1	40,1	50,1	60,1	70,1	80,1	90,2	100,2	110,2	120,2	130,3	140,4	150,6
Célula 6	10,0	19,9	29,9	39,9	49,9	60,1	70,1	80,3	90,3	100,2	110,3	119,8	129,3	138,2	144,0

Tabela 7. c - Teste de linearidade: retirada das massas.

	MASSAS (RETIRADA) em gramas				
	100,00	50,00	20,00	10,00	0,00
Célula 1	100,1	50,1	20,1	10,0	0,0
Célula 2	100,1	50,2	20,2	10,2	0,2
Célula 3	100,0	50,1	20,0	10,0	0,1
Célula 4	100,4	50,2	20,1	10,1	0,1
Célula 5	100,6	50,5	20,4	10,5	0,5
Célula 6	100,6	50,5	20,4	10,4	0,4

Nestes testes, a coluna relativa à colocação de 100g chama a atenção, por apresentar erros em 5 das 6 células. Estes erros não poderiam existir, já que este foi o peso usado na própria calibração das células. Além disto, percebe-se uma tendência geral ao aumento do peso informado, erro que se conserva com a retirada da carga.

Já em testes preliminares, com o primeiro protótipo de célula de carga confeccionado em alumínio, percebeu-se que se o peso fosse deixado sobre a célula ocorria um aumento gradativo no valor de peso informado. Retirado o

peso, este valor se mantinha indefinidamente, caracterizando um escoamento do metal. Assim, novas células de carga foram feitas em aço, procurando-se fugir deste efeito. Para testar-se a estabilidade da medida destas novas células, o sistema foi deixado em registro por aproximadamente 48h, sem peso, e a temperatura foi registrada simultaneamente. A Figura 49 e a Figura 50 mostram os gráficos deste registro.

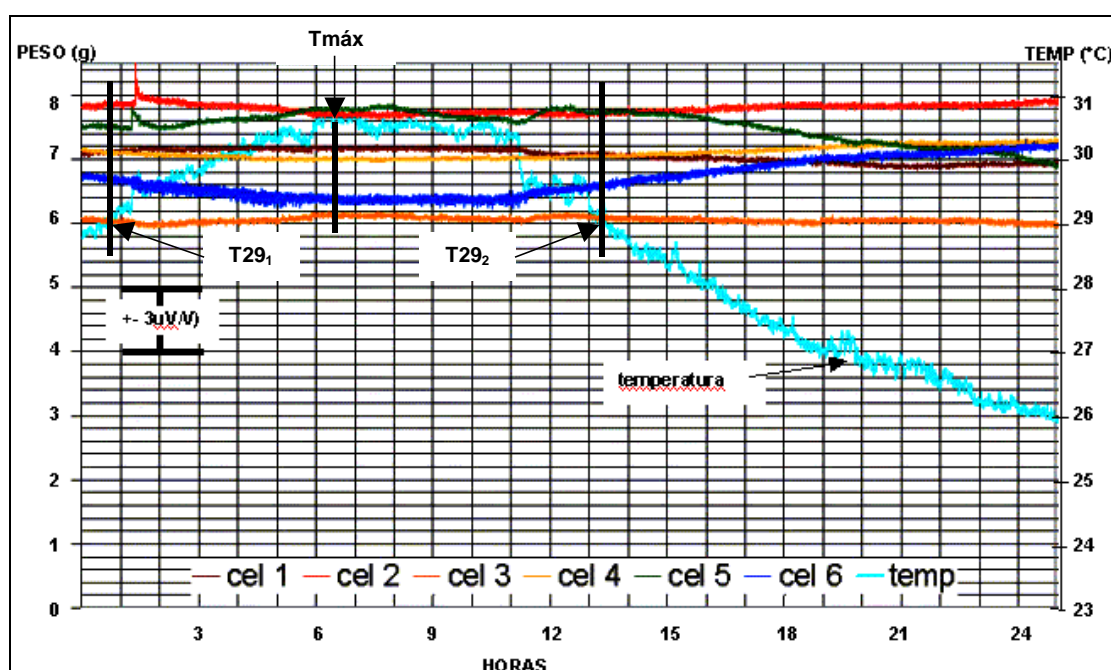


Figura 49 – Teste de estabilidade das células de carga, primeiras 24h. Cada uma das linhas coloridas representa o peso medido (eixo vertical esquerdo) em cada uma das células, ao longo do tempo. Conforme a legenda, a linha azul claro informa a temperatura (eixo vertical direito).

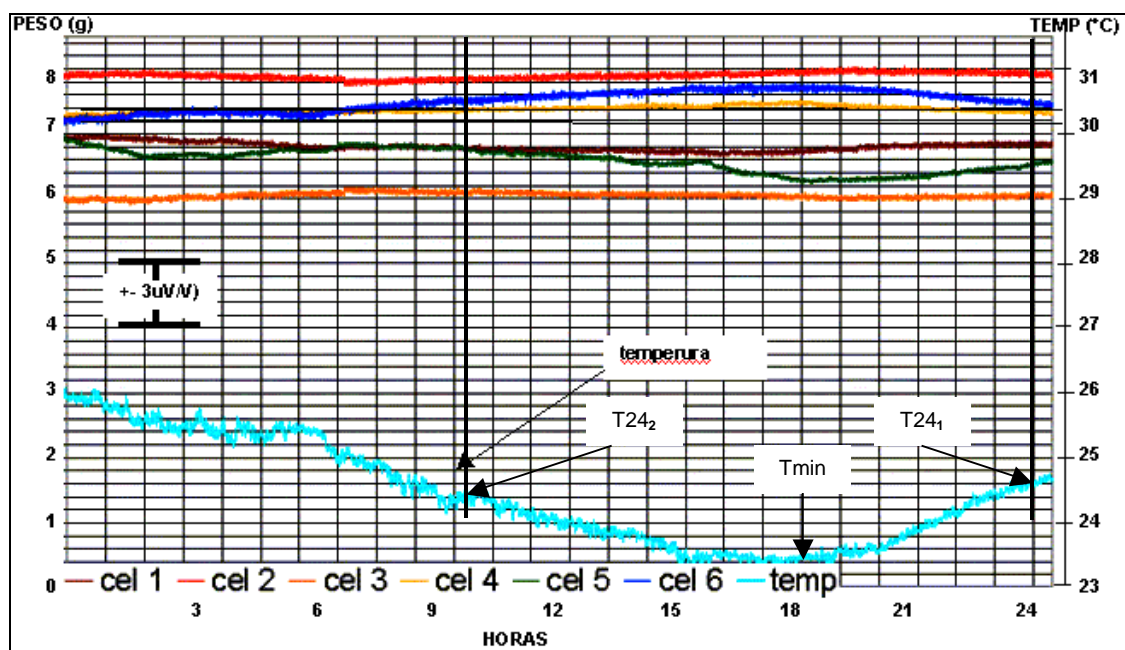


Figura 50 – Continuação do teste (24h seguintes) .

Nestes dois gráficos, Figura 49 e Figura 50, foram marcados os instantes de máxima temperatura ($T_{m\acute{a}x}$); mínima temperatura ($T_{m\acute{i}n}$), e momentos distintos em que a temperatura se repete: em 29°C (T_{29_1} e T_{29_2}) e depois em 24,6°C (T_{24_1} , T_{24_2}). Com estes pontos procurou-se avaliar: 1) quanto variou a medida com a variação da temperatura entre $T_{m\acute{i}n}$ e $T_{m\acute{a}x}$, e 2) quanto variou a medida em dois momentos de mesma temperatura, porém afastados cerca de 12 a 14h. A Tabela 8 mostra estas variações.

Tabela 8 - Variações a longo prazo das células de carga.

Célula	Variação com a Temperatura			Mesma Temperatura x Momentos Distintos					
	$T_{m\acute{i}n}$ (3,4°C)	$T_{m\acute{a}x}$ (30,6°C)	Diferença 1	T_{29_1}	T_{29_2}	Diferença 2	T_{24_1}	T_{24_2}	Diferença 3
1	6,70	7,15	0,45	7,10	7,05	0,05	6,80	6,80	-
2	7,95	7,70	-0,25	7,85	7,75	-0,10	7,95	7,80	-0,15
3	6,00	6,15	0,15	6,00	6,05	0,05	6,05	6,10	0,05
4	7,50	7,00	-0,50	7,10	7,05	0,05	7,35	7,35	-
5	6,3	7,80	1,50	7,50	7,75	0,25	6,50	6,80	0,30
6	7,7	6,20	-1,50	6,70	6,60	-0,10	7,30	7,50	0,20

Idealmente, as células de carga não deveriam variar seus sinais devido a variações de temperatura: primeiro porque os strain-gauges são compensados para não responder a dilatação térmica do metal, e segundo porque como todos estão colados na mesma estrutura metálica, se houvesse alguma variação por temperatura, seria igual em todos, resultando em um sinal nulo por causa da configuração em ponte na qual estão conectados.

Contudo, nestas células, medidas de 1g são relativas a variações de aproximadamente $3\mu\text{V}/\text{V}$. Na estrutura metálica esta variação significa uma deformação de $1,5\mu\text{m}/\text{m}$ (dado o ganho do strain-gauge e o arranjo em ponte). Assim, se existirem gradientes térmicos no metal, diferenças entre strain-gauges ou outros fatores aleatórios que provoquem variações indesejadas na medida, mesmo pequenas como $0,5\mu\text{m}/\text{m}$, ocorrerão diferenças na leitura entre 0,3 e 0,6g, dependendo da natureza da variação (elétrica ou mecânica).

Para testar a fluência elástica das células, foi registrada a colocação e a retirada, 24h depois, de uma carga de 110g. O gráfico da Figura 51 ilustra a colocação da carga, que pode ser observada na subida abrupta da linha de registro, enquanto que o gráfico da Figura 52 ilustra a retirada da carga, observada pela descida abrupta da linha.

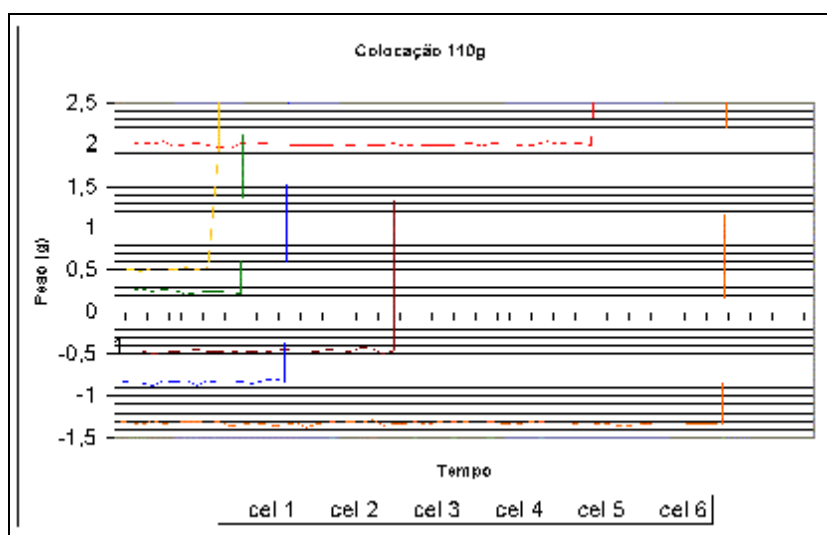


Figura 51 – Momento de colocação das cargas.

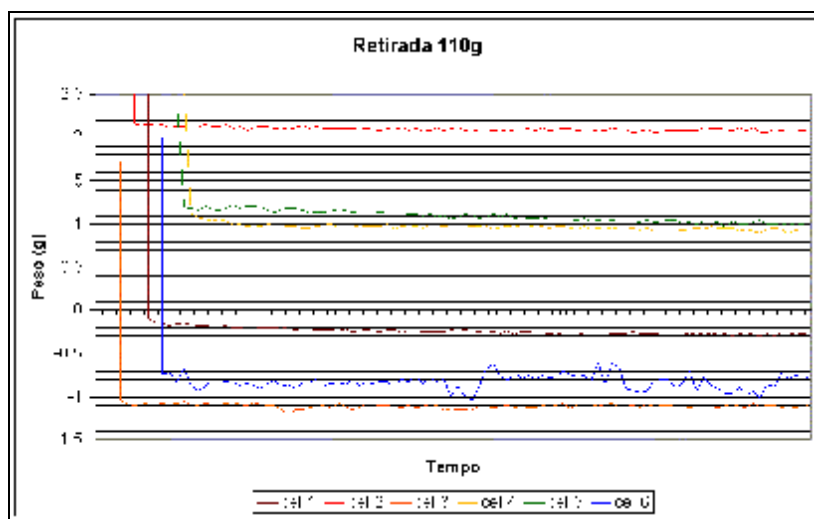


Figura 52 - Momento de retirada das cargas (24h depois) .

É possível observar que, na retirada da carga, as medidas das células de carga não voltam ao nível que estavam antes da colocação da carga, o que só vai acontecer cerca de outras 24h depois. Contudo, como a medida volta ao valor inicial, mesmo que seja depois de muito tempo, não se pode atribuir este efeito à deformação plástica do metal. Assim, o mais provável é que este efeito seja causado por um arraste, um fenômeno não elástico. A acomodação da cola (que une o strain-gauge ao metal), por exemplo, pode causar um atrito que gera uma força contra a deformação metálica. Esta situação pode ser análoga a uma mola comprimida (metal), que é solta contra um amortecedor viscoso (cola). À medida que a mola volta a seu tamanho original (perde a deformação), sua força diminui, e a velocidade de deslocamento diminui, demorando em voltar ao deslocamento zero.

A importância das imprecisões relatadas neste capítulo, frente aos objetivos do sistema de medição nos experimentos com animais, será discutida a seguir.

7.2 Testes com Animais

Estes testes procuraram avaliar a qualidade das células de carga como transdutores frente a necessidade das investigações com animais, numa situação real. O sistema foi instalado em duas gaiolas com três células de carga em cada. Para cada animal foi disponibilizada ração, água e solução salina. O sistema

registrou o consumo destes insumos por 24 horas consecutivas, sem intervenção do investigador. A Figura 53 ilustra o momento de ingestão de água, solução salina e comida, nos canais 1, 2 e 3 respectivamente. A linha vermelha significa o peso do alimento no tempo.

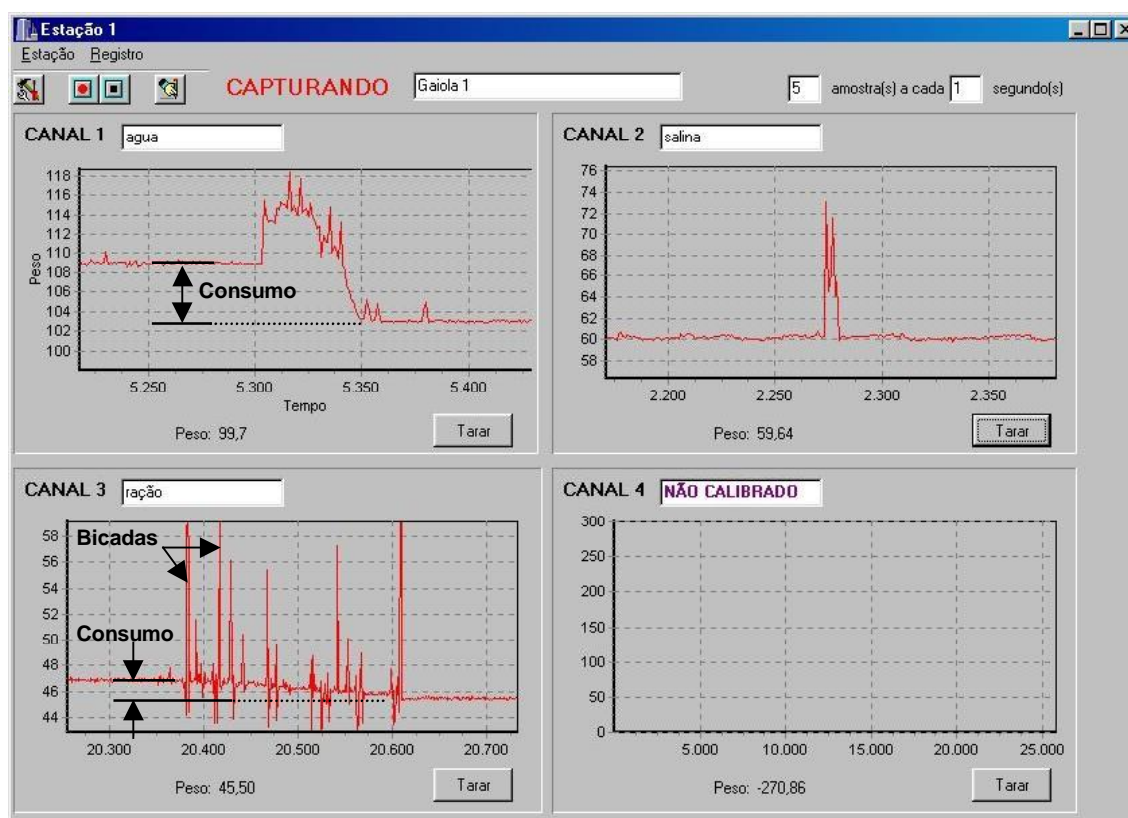


Figura 53 – Três eventos ingestivos: água, solução salina e ração. As bicadas são identificadas pelos picos do gráfico. O consumo equivale ao peso antes menos o peso após a(s) bicada(s).

Estes gráficos permitem a extração de diversos atributos. O consumo de ração caracteriza-se por uma série de bicadas representadas pelos picos de peso do respectivo gráfico. Pode-se observar que nas primeiras cinco bicadas o animal não consumiu o alimento, já que o peso não diminuiu (talvez estivesse revirando a comida para escolher os grãos). Contudo, em seguida, cada bicada diminui o peso total de ração, caracterizando o consumo. No consumo de água, por exemplo, já se observa um padrão diferente: o animal encosta o bico no bebedouro, aumentando o peso, e suga uma determinada quantidade, diminuindo-o.

8. DISCUSSÕES

Neste trabalho foi proposto o desenvolvimento de um sistema para registro de atributos micro e macro-estruturais da ingestão de alimentos em aves.

O sistema foi projetado para constituir uma plataforma onde se pudesse agregar módulos orientados a registros de parâmetros de comportamento alimentar. Estes módulos são formados por transdutor de um lado, e aplicativo de registro (que roda no computador) em outro. Para garantir compatibilidade com diferentes módulos o sistema foi desenvolvido com estas duas pontas flexíveis. Por um lado, estações com entradas universais para transdutores. Por outro, uma rotina no computador que permite a aplicativos acessar os dados medidos por qualquer transdutor, de qualquer estação, sem inteirar-se dos procedimentos de rede (conexão). Este objetivo foi alcançado e testado com sucesso pelo módulo de registro desenvolvido. Na mesma estação onde se mediu o sinal de uma célula de carga, com resolução de $1\mu\text{V}$ em uma faixa de 2mV, foi acrescentado um transdutor de temperatura com sinais de até 4V (duas mil vezes maior) sem que fossem necessárias particularizações no sistema. Já a rotina de acesso à rede, no computador, permitiu que todas modificações efetuadas no protocolo de rede pudessem ser feitas sem alteração do aplicativo de registro. Esta vantagem também pôde ser observada na programação do microcontrolador. Os serviços (virtuais) de acesso à rede organizaram as tarefas que computador e microcontrolador devem executar e agregou facilidade na manutenção e melhoria do sistema, já que se pode modificar um bloco sem interferir em outro. Este é um dos pontos fortes que caracterizam a flexibilidade do sistema à expansão, como a criação futura módulos para registros de outros tipos de parâmetros ou o desenvolvimento de um protocolo de comunicação bidirecional, que permitiria implantar saídas nas estações e efetuar controle sobre o experimento, por exemplo.

A topologia em anel, escolhida para a rede, limita a taxa de transmissão no barramento porque sobrecarrega as estações mais próximas ao computador. Por outro lado, nesta topologia cada estação tem um meio exclusivo de transmissão. Esta é característica demonstrou-se como aspecto mais relevante desta topologia.

O meio exclusivo de transmissão permitiu o desenvolvimento rápido de um protocolo seguro, porque elimina a necessidade de implementação de algoritmos para arbítrio do barramento e endereçamento de estações. Além desta vantagem de desenvolvimento, esta topologia agregou uma vantagem técnica que beneficia o usuário: a conexão de uma nova estação no sistema não interfere na comunicação das outras. Assim, estações podem ser adicionadas com o sistema ligado e registrando, sem perda de dados.

Devido a características técnicas do sistema, o número de gaiolas ou estações pode ser incrementado até o limite teórico de 19 estações, para a atual taxa de transmissão utilizada. O uso de taxas de transmissão mais elevadas diminuem o tempo disponível para os microcontroladores das estações executarem o serviço de rede. Assim, o número limite de estações está intimamente relacionado com a taxa de transmissão usada no barramento e esta, por sua vez, está relacionada à capacidade de processamento do microcontrolador utilizado. Alguns meses após o início do projeto foi lançado no mercado um microcontrolador com conversor A/D integrado (MCS1210, Burr-Brown Corporation), com cerca de 5 vezes mais capacidade de processamento e ruído de conversão das entradas analógicas cerca de 10 vezes menor que o do A/D usado neste trabalho. Se mais estações forem produzidas seria interessante avaliar a utilização deste componente.

Um bom motivo para aumentar a taxa de transmissão no barramento seria aumentar a taxa de aquisição das estações, que atualmente é de 5Hz por canal. Isso permitiria expandir o uso do sistema para aquisição de alguns sinais bioelétricos dos animais, como ECG (eletrocardiograma), EEG (eletroencefalograma) e quaisquer outros sinais de frequências mais elevadas.

Apesar do caráter artesanal dos transdutores (células de carga) desenvolvidos para o Módulo de Registro dos Parâmetros Ponderais, que não conferiram tanta estabilidade e precisão como as de modelos comerciais, suas características são suficientes para o propósito dos experimentos. Todos atributos extraídos de observações temporais não são prejudicados pelas imprecisões na medida de peso, como o tempo que o animal levou para começar a comer (latência), o tempo de uma refeição, o intervalo entre refeições e etc.

Em relação aos atributos extraídos de parâmetros quantitativos de peso, cabe observar que as experiências com animais ocorrem em ambientes controlados, onde a temperatura não sofre variações maiores do que 2°C. Nas piores células de carga desenvolvidas (células 5 e 6) poderia significar 0,5g de incerteza. Eliminando-se, contudo, estas duas células de carga, a incerteza por variação de temperatura cairia para apenas 0,2 ou 0,3g nas medidas entre 0 e 150g.

O erro devido à acomodação da célula, que gera um aumento gradativo no peso informado durante observações de longo prazo, pode chegar a 1g, conforme os testes efetuados. Contudo, as refeições dos animais são eventos rápidos. Assim, medidas de consumo por refeição, que são medidas relativas (peso antes da refeição – peso depois da refeição) não seriam influenciadas por este erro. O erro apareceria apenas na diferença entre a totalização dos consumos de todas as refeições dentro de 24h (a medida correta) em contraste com a medida do valor ao final de 24h menos o valor no início do experimento (medida com erro máximo de 1g para 100g de carga).

9. CONCLUSÕES

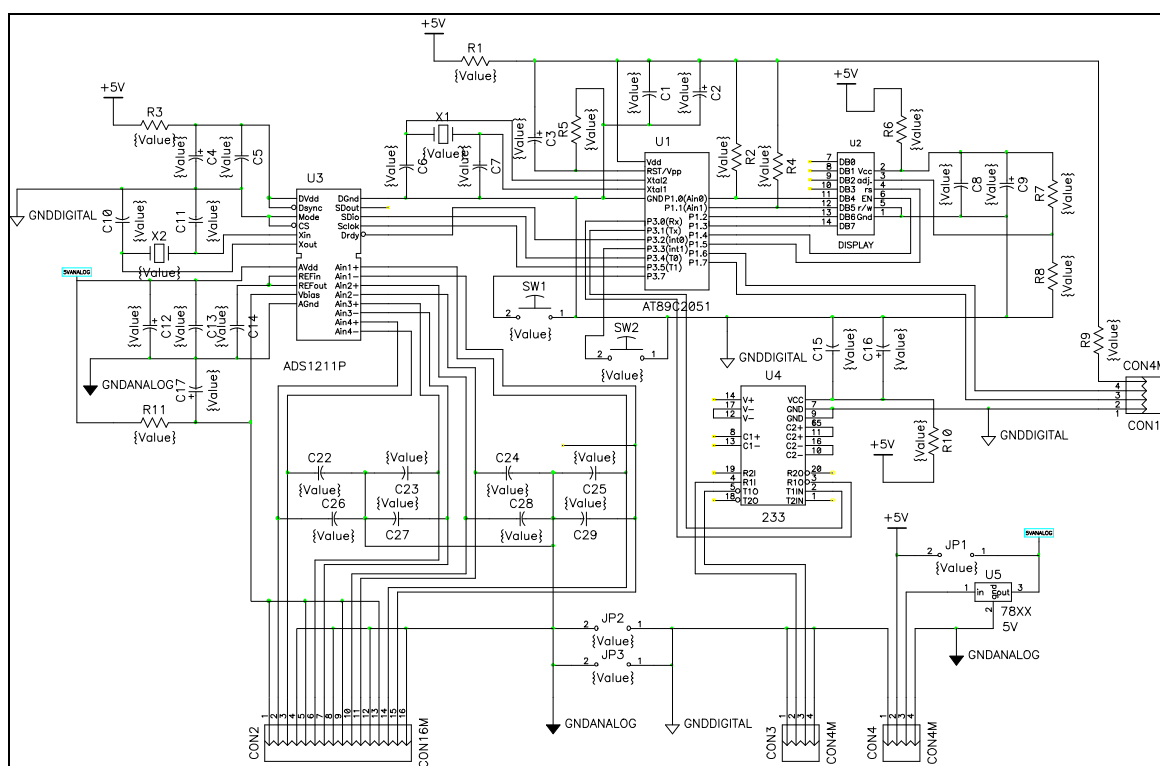
Este sistema permitiu a medição contínua de fenômenos ingestivos (consumo de água e alimentos) de baixa frequência (até 5Hz), além de temperatura ambiente, de maneira automática e distante do ambiente dos animais.

Este sistema incrementou a qualidade de medição dos fenômenos ingestivos porque permitiu observar parâmetros que antes escapavam à capacidade de observação do investigador e porque diminuiu a interferência da observação sobre o animal. Os registros obtidos permitiram a extração de atributos comportamentais importantes como momento da ingestão, quantidade total consumida, duração de refeição, e outros, que não podiam ser extraídos pelo método manual ou pelos métodos citados na literatura.

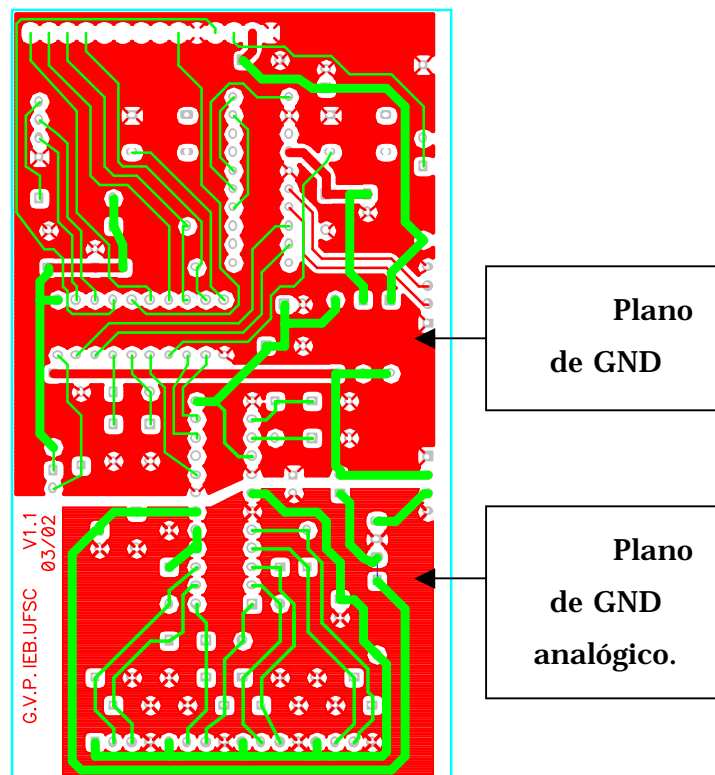
Os investigadores do laboratório de fisiologia, onde o sistema foi testado, não encontraram dificuldades e sentem-se estimulados a utilizar o sistema, que se demonstra realmente prático e intuitivo.

O registro das medidas em arquivo de formato reconhecido por planilhas eletrônicas têm permitido a análise dos registros de comportamento em diferentes aplicativos comerciais, como o Microsoft®Excel ou Statistica® (StatSoft, Inc).

ANEXO 1 – ESQUEMA ELETRÔNICO DA ESTAÇÃO



ANEXO 2 – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KELLEY, A. E.; BAKSHI, V.P.; HABER, S.N. et al. Opioid modulation of taste hedonics within the ventral striatum. *Physiology & Behavior*, v. 76, p. 365-377, 2002.
- [2] SICHIERI, R.; COITINHO, D.C.; LEÃO, M.M. et al. High temporal, geographic and income variation in body mass index among adults in Brazil. *Am J Pub Health*, v. 84, p. 793-798, 1994.
- [3] KUCZMARSKI, R.J.; FLEGAL, K.M.; CAMPBELL, S.M. et al. Prevalence of overweight among US adults. *The National Health and Nutrition Surveys*, v.272, p. 205-211, 1994.
- [4] SORENSEN, T.I.A.; PRICE, R.A. Secular trends in body mass index among danish young men. *Int J Obesity*, v. 14, p. 411- 419, 1990.
- [5] HILL, A.J.; ROGERS, P.J.; BLUNDELL, J.E. Techniques for the experimental measurement of human eating behaviour and food intake: a practical guide. *International Journal of Obesity*, v. 19, p. 361-375, 1995.
- [6] STEFFENS, S.M.; CASAS, D.C.; MILANEZ, B.C. et al. Hypophagic and dipsogenic effects of central 5-HT injections in pigeons. *Brain Res. Bull.*, v. 44, p. 681-688, 1997 a.

- [7] STEFFENS, S.M.; CASAS, D.C.; MILANEZ, B.C. et al. Participação de receptores 5-HT_{2a-2c} e 5-HT-3 na regulação da ingestão de alimentos e água em pombos. In: *XIX Congresso Latino-americano de Ciências Fisiológicas*, v. 19, p. 22, Caracas, Venezuela, Anales....., Caracas: ALACF, 1997 b.
- [8] CANELLO, M.; RAVAZIO, M.R.; PASCHOALINI, M.A. e MARINO-NETO, J. Food deprivation-vs. intraventricular adrenaline-induced feeding and postprandial behaviors in the pigeon (*Columba livia*). *Physiology & Behavior*, v. 54, p. 1075-1079, 1993.
- [9] DARIO, A.J.S.; LOPES, P.R.C.; FREITAS, C.G.; PASCHOALINI, M.A. et al. Electrographic patterns of postprandial sleep after food deprivation or intraventricular adrenaline injections in pigeons. *Brain Res. Bull.*, v. 39, p.249-254, 1996.
- [10] ZEIGLER, H. P.; LEVITT, P. W.; LEVINE, R.R. Eating in the pigeon (*Columbia livia*): Movement Patterns, Stereotypy, and Stimulus Control. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, v. 94, n. 5, 1980.
- [11] KLEVEN, M. S.; KOEK, W. Pharmacological Characterization of in Vivo Properties of Putative Mixed 5-HT_{1A} Agonist/5-HT_{2A/2C} Antagonist Anxiolytics. I. Antipunishment effects in the pigeon. *J Pharmacol Exp Ther*, v. 276, n. 2, p. 388-97, 1996.
- [12] BARRETT, J. E.; GAMBLE, E. H.; ZHANG, L. et al. Anticonflict and Discriminative Stimulus Effects in the Pigeon of a New Methoxy-chroman 5-HT_{1A} Agonist, (+)S 20244 and its Enantiomers (+)S 20499 and (-)S 20500. *Psychopharmacology*, v. 116, n. 1, p. 73-78, 1994.
- [13] ZEIGLER, H. P.; GREEN, H.L.; LEHERER, R. Patterns of feeding behavior on the pigeon. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, v. 76, n. 3, p. 468-477, 1971.

- [14] HÖRSTER, W.; KRUMM, E.; MOHR, C. et al. Conditioning the Pecking Motions of Pigeons. *Behavioural Processes*, v. 58, p. 27-43, 2002.
- [15] MARTARESCHE, M.; FUR, C.; MAGNUSSON, M. ET AL. Time Structure of Behavioral Patterns Related to Feed Pecking in Chicks. *Physiology & Behavior*, v.70, p. 443-451, 2000.
- [16] ZELENOVSKY, R.; MENDONÇA, A. *PC: Um Guia Prático de Hardware e Interfaceamento*. 2. ed. Rio de Janeiro : MZ Editora, 1999.
- [17] LAX, P.; ZAMORA, S.; MADRID, J. A Contact Eatometer Suitable for Feeding Restriction Schedules. *Physiology & Behavior*, v. 59, n. 6, p. 1179-1183, 1996.
- [18] SIEMANN, M.; DELIUS, J.D. Variability of forage pecking in pigeons. *Ethology*, v. 92, p. 29-50, 1992. Paul Parey Scientific Publishers, Berlin and Hamburg 1992.
- [19] SCHULMAN, A. *Windows 95 Não-Autorizado*. 1. ed. São Paulo : LCTE, 1995.
- [20] SILVA, M. R. ANAMOD – *Módulo de Controle para o Sistema de Aquisição e Análise de Sinais Bioelétricos SAASBIO III*. Florianópolis, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [21] BORCHARDT, I.G. Fundamentos de Instrumentação para Monitoração e Controle de Processos. 2. ed. São Leopoldo : Editora Unisinos, 1998.
- [22] SKOLNIK, H. L. Noise and Wiring in Data Signal Handling. In: *Process/Industrial Instruments & Control Handbook*. 4. ed. New York : McGraw-Hill, 1993. p. 7.29-7.53.

- [23] CONSIDINE, D. M. *Process/Industrial Instruments & Controls Handbook*. 4. ed. New York : McGraw-Hill, 1993.
- [24] SKOLNIK, H. L. Data Signal Handling in Computerized Systems. In: *Process/Industrial Instruments & Control Handbook*. 4. ed. New York : McGraw-Hill, 1993. p. 7.2-7.29.
- [25] BORCHARDT, I.G. O circuito ponte para medição de impedâncias e grandezas físicas. 1. ed. São Leopoldo : Editora Unisinos, 1998.
- [26] GARRET, P. H. *Advanced Instrumentation and Computer I/O Design*. 10. ed. Piscataway, NJ, USA : IEEE Press, 1994.
- [27] CHAMBERS, A. J.; TANTARATANA, S.; BOMAR, B. W. Digital Filters. In: *The Electronics Handbook*. 10. ed. USA : CRC Press, IEEE Press, 1996. p. 749-772.
- [28] TEXAS INSTRUMENTS, *ADS1211, 24-bit Analog to Digital Converter*. ADS1211.pdf, <http://www.ti.com>.
- [29] DOUGLASS, B. G. Thermal Noise and Other Circuit Noise. In: *The Electronics Handbook*. 10. ed. USA : CRC Press, IEEE Press, 1996. p. 30-39.
- [30] ATMEL CORPORATION, *AT89C2051 8 bit Microcontroller whit 2k Bytes Flash*. DOC0368.pdf, literature@atmel.com, <http://www.atmel.com>.
- [31] MCS51 MICROCONTROLLER FAMILY USER'S MANUAL, Intel Corporation Literature Sales, 1993.
- [32] COX, T. G. Distributed Numerical Control and Networking. In: *Process/Industrial Instruments & Control Handbook*. 4. ed. New York : McGraw-Hill, 1993. p. 3.117-3.162.

- [33] TANENBAUM, A.S. *Redes de Computadores*. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1997.
- [34] CHAN, C. J. Television and Video Production Systems. In: *The Electronics Handbook*. 10. ed. USA : CRC Press, IEEE Press, 1996. p. 1575-1598.
- [35] MALVINO, A. *Microcomputadores e Microprocessadores*, 1. ed. São Paulo : McGraw-Hill do Brasil, 1995.
- [36] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, *+5V Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers*. MAX220-MAX249.pdf, <http://www.maxim-ic.com>.
- [37] CANTÚ, M. *Dominando o Delphi 3 a Bíblia*. 1. ed. São Paulo : Makron Books, 1997.
- [38] HYMAN, M. *Borland C++ Para Leigos*. 1. ed. São Paulo : Berkeley, 1995.
- [39] DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. *Pattern Classification*. 2. ed. USA : Wiley-Interscience, 2001.
- [40] EDMINISTER, J. *Circuitos Elétricos*. 2. ed. São Paulo : McGraw-Hill, 1985.
- [41] HOFFMANN, K. *An Introduction to measurements using strain gages*. 1. ed. Darmstadt, Germany : Hottinger Baldwin Messetechnik GmbH, 1987.